

Rapport

Korrosion på vertikala stålstänger i jord med olika vattenhalt – laboratorieundersökningar med luftningsceller och galvanisk korrosion

Corrosion on vertical carbon steel bars in a soil with variable water content – laboratory investigations with differential aeration cells and galvanic corrosion

Tor-Gunnar Vinka, Göran Camitz & Henrik Linder

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning	5
1 Bakgrund.....	8
2 Syfte	9
3 Vattenförekomst i jord.....	10
4 Allmänt om korrosion i jord.....	14
4.1 Korrosionens elektrokemiska natur i jord	14
4.2 Inverkan av jordens vattenhalt på korrosionen.....	15
5 Tekniskt utförande	17
5.1 Allmänt	17
5.1.1 Försök 1: Okopplade provplåtar.....	17
5.1.2 Försök 2: Kopplade provplåtar.....	17
5.1.3 Försök 3: Galvanisk korrosion.....	17
5.1.4 Mätningar	17
5.2 Försöksjord och provlösning	19
5.3 Material och provutformning	20
5.4 Provplacering.....	21
5.4.1 Provnivåer	21
5.4.2 Försök 1 med okopplade plåtar	22
5.4.3 Försök 2 med hopkopplade plåtar	23
5.4.4 Försök 3 med galvanisk korrosion	24
5.5 Fuktning av jorden.....	25
6 Mätningar.....	27
6.1 Vattenhalt, vattenkvot och vattenmättnadsgrad	27
6.2 Strömmätning	29
6.3 Potentialmätning.....	29
6.4 Betning	29
6.5 Korrosionshastighet.....	30
6.5.1 Jämn korrosion.....	30
6.5.2 Lokal korrosion	31
6.5.3 Korrosion på grund av strömbelastning	31
7 Resultat.....	33
7.1 Vattenhaltsprofil	33
7.2 Strömmätningar	33
7.2.1 Kopplade provplåtar.....	33
7.2.2 Galvanisk korrosion	33
7.3 Potentialmätningar.....	39
7.3.1 Okopplade provplåtar och provstänger	39
7.3.2 Kopplade provplåtar.....	39
7.3.3 Galvanisk korrosion	39

7.4	Korrosionshastigheter	44
7.4.1	Okopplade provplåtar och provstänger	44
7.4.2	Kopplade provplåtar	46
7.4.3	Galvanisk korrosion	48
8	Diskussion.....	50
8.1	Strömmätning	50
8.1.1	Kopplade provplåtar	50
8.1.2	Galvanisk korrosion	50
8.1.3	Felkällor	51
8.2 Potentialmätning	52
8.2.1	Korrosionspotential för okopplade plåtar.....	52
8.2.2	Felkällor vid frånslagspotentialmätningar.....	52
8.2.3	Frånslagspotential för kopplade provplåtar.....	56
8.3	Korrosionshastigheter	57
8.3.1	Okopplade provplåtar.....	57
8.3.2	Kopplade provplåtar.....	57
8.4	Jämförelse mellan korrosionshastigheter för okopplade och kopplade provplåtar på olika provnivåer.....	58
8.4.1	Nivå 1	58
8.4.2	Nivå 2.....	59
8.4.3	Nivå 3.....	59
8.4.4	Nivå 4.....	61
8.4.5	Nivå 5.....	61
8.5	Galvanisk korrosion.....	62
8.5.1	Laboratorieundersökning av galvanisk korrosion i USA.....	62
8.6	Slutsatser från laboratorieundersökningarna	65
8.6.1	Okopplade provplåtar av stål	65
8.6.2	Hopkopplade provplåtar av stål	65
8.6.3	Galvanisk korrosion på stål.....	66
9	Fältförsök med luftningsceller i fyllningsjord i Göteborg.....	68
9.1	Försöksområde	68
9.2	Utförande	69
9.3	Mätning av resistivitet i jorden.....	70
9.3.1	Använda resistivitetsmetoder	71
9.4	Mätning av ström och potential	73
9.5	Resultat och diskussion	74
9.5.1	Resistivitetsmätningar	74
9.5.2	Potentialmätningar	76
9.5.3	Korrosionshastigheter	79
9.6	Slutsatser från fältundersökningen	83
10	Referenser	84
BILAGOR	87

Sammanfattning

En laboratorieundersökning har utförts med inriktning på ökad förståelse av korrosionsförloppet i och kring grundvattenzonen i jord.

Små provplåtar av kallvalsat kolstål placerades på fem olika djup (provnivåer) ovanför varandra i två plastcylindrar som var fylld med grovsand. Provplåtarna fanns på fem olika nivåer (*nivå 1* till *5*) i provkärlen. *Nivå 1* fanns högst upp i kärlet och *nivå 5* längst ned i kärlet. Jorden på *nivå 5* var vattenmättad och vattenhalten minskade därefter successivt för provnivåer högre upp i kärlet. På *nivå 1* var jorden ”torr” med mycket låg vattenhalt.

I det ena provkärlet placerades fem fria, sinsemellan okopplade provplåtar på fem olika provnivåer sanden. Det fanns två vertikala rader med vardera fem provplåtar bredvid varandra.

I det andra provkärlet placerades fem provplåtarna på fem olika provnivåer, som anslöts till varandra via mätledning och en kopplingsplint. Två sådana vertikala rader med vardera fem hopkopplade plåtar placerades intill varandra. Genom sammankopplingen gavs korrosionsprocessen på en provplåt möjlighet att på ett anodiskt eller katodiskt sätt kunna påverka korrosionsprocessen på en annan provplåt i plåtraden.

I ett tredje provkärl undersöktes galvanisk korrosion (bimetallkorrosion) mellan hopkopplade stänger av kolstål och koppar. Arean hos kolståls- och kopparstängerna var lika stor. I kärlet fanns också en fritt exponerad, icke hopkopplad kolstålsstång.

Korrosionens beroende av vattenhalten på okopplade provplåtar av stål (fritt exponerade provplåtar) kan sammanfattas enligt följande:

Hög vattenhalt	* Låg jämn korrosion * Låg lokal korrosionshastighet
Vattenhalt cirka 7 mass-%	* Mycket hög jämn korrosion * Mycket kraftig gropfrätning
Låg vattenhalt	* Måttlig jämn korrosion
Vattenhalt < 7 mass-%	* Påtaglig gropfrätning

Den högsta korrosionshastigheten erhöles på *nivå 3* med vattenhalt cirka 7 mass-% och den lägsta korrosionshastigheten på *nivå 5* med vattenmättad jord. Korrosionshastigheten var också låg på *nivå 4*.

Vid hopkoppling av provplåtar av kolstål bildades en galvanisk cell av typen luftningscell. Det sker en utjämning mellan korrosionshastigheterna på provplåtarna vid hopkopplingen. Det fanns ingen provplåt med lika hög jämn korrosionshastighet som vid vattenhalten 7 mass-% vid försöket med okopplade provplåtar. Det fanns heller ingen provplåt med lika låg jämn korrosionshastighet, som i vattenmättad jord vid försöket med okopplade provplåtar.

Vid hopkoppling av provplåtar fungerade provplåtarna på de två nedersta provnivåerna (*nivåerna 4 och 5*) med högsta vattenhalten som anoder i den galvaniska cellen (luftningscellen) och korroderat på grund av strömbelastningen. Provplåtarna på *nivåerna 2 och 3* har varit katoder i den galvaniska cellen och erhållit visst katodiskt skydd. Strömmen för provplåtarna på *nivå 1* med lägsta vattenhalten har varierat omkring noll. Provplåtarna på *nivå 1* har i huvudsak korroderat oberoende av de andra provplåtarna på de olika provnivåerna. Plåtarna särskilt på *nivå 1*, men också på *nivå 2*, hade endast i liten omfattning fungerat som katoder.

Provplåtarna på *nivå 3* hade tillsammans med provplåtarna på *nivå 4* bildat i stort sett egna luftningsceller, där provplåtarna på *nivå 3* verkat som katoder och provplåtarna på *nivå 4* som anoder.

Vid korrosion orsakad av luftningsceller och galvanisk korrosion (bimetallkorrosion) kan den totala korrosionen delas upp i korrosion orsakad av strömbelastning och egenkorrosion:

$$\text{Total korrosion} = \text{Korrosion orsakad av strömbelastning} + \text{Egenkorrosion}$$

Med egenkorrosion menas korrosion utan påverkan av strömbelastning. Egenkorrosionen vid galvanisk korrosion eller vid korrosion orsakad av luftningsceller är inte samma sak som "vanlig" korrosion hos ett okopplat föremål, som inte utsätts för galvanisk korrosion eller korrosion orsakad av luftningsceller.

Korrosion orsakad av strömbelastning förekom på *provnivå 4 och 5*. På dessa nivåer dominerade också korrosionen orsakad av strömbelastning över egenkorrosionen. Egenkorrosionen vid hopkoppling av provplåtar var av samma storlek, som korrosionshastigheten för okopplade provplåtar.

I försöken med galvanisk korrosion ökade korrosionshastigheterna för stålstångerna kraftigt från cirka 40 µm/år i okopplat tillstånd till 150 µm/år vid sammankoppling med kopparstänger. Korrosionshastigheten var alltså 3,9 gånger större – ökningen var 290 % – vid sammankoppling med koppar.

Korrosionen orsakad av egenkorrosion var ungefär lika stor, som korrosionen orsakad av strömbelastning. Egenkorrosionen på de hopkopplade stålstångerna var betydligt högre än korrosionen på den fristående stålstången. Egenkorrosionen vid galvanisk korrosion var ungefär dubbelt så stor, som korrosionshastigheten för den okopplade stången.

Resultaten från laboratorieundersökningarna kompletteras och jämförs med ett fältförsök med luftningsceller i jord. Fältförsöket med luftningsceller utfördes i fyllningsjord i stadsmiljö i Göteborg i ett samarbetsprojekt mellan Avdelningen för vattenvårdsteknik, Institutionen för anläggning och miljö, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm, Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg och dåvarande Korrosionsinstitutet.

Fältförsöket har utförts i ett område i direkt anslutning till Chalmersområdet. Området är gräsbevuxet och ligger vid Sven Hultins gata. De ytliga jordlagren inom försöksom-

rådet består av 1 – 1,5 m tjockt lager fyllningsmaterial som överlagrar den naturligt avsatta jorden bestående av kärrtorv med visst lerinnehåll. Fyllningsjorden karaktäriseras av en moränliknande kornstorleksfördelning. I fyllningsjorden dominerade sand- och grusfraktionerna och den benämns lerig grusig sand. Förutom naturliga jordarter fanns byggnadsavfall: tegelstenar, träbitar och järnskrot i fyllningsjorden.

Luftningscellerna skapades genom att två provplåtar av kallvalsat kolstål förbands elektriskt med en kabel. Den ena provplåten låg i fyllningsjord, medan den andra var inbäddad i en utplacerad stor lerklump med siltig lera.

Inverkan av areaförhållandet mellan provplåtarna i fyllningsjord respektive siltig lera undersöktes genom att skapa luftningsceller med olika stora provplåtar i den permeabla fyllningsjorden. Alla provplåtar i siltig lera hade arean $0,02 \text{ m}^2$. Hälften av provplåtarna i fyllningsjord var små med arean $0,02 \text{ m}^2$, medan hälften var stora med arean $0,2 \text{ m}^2$. Hälften av luftningscellerna hade därmed areaförhållandet 1:1 och hälften 10:1 mellan provplåtarna i fyllningsjord respektive siltig lera.

Provplåtarna i siltig lera var alltid anod i luftningscellen. Detta gäller såväl vid hopkoppling med små som stora provplåtar i fyllningsjorden. Provplåtarna i fyllningsjorden var alltså katoder i luftningscellen.

Den jämna massförlustbestämda korrosionshastigheten hos anodplåtarna i siltig lera ökade kraftigt med 163 % från 14 till $36 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med liten katodplåt i fyllningsjord och med hela 362 % från 14 till $62 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med stor katodplåt i fyllningsjord. Korrosionshastigheten hos anodplåtarna i siltig lera ökade 1,7 gånger när arean hos katodplåtarna ökade 10 gånger.

Korrosionen hos anodplåtarna i siltig lera orsakad av strömbelastning var $4,6 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med liten provplåt i fyllningsjorden och $29 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med stor provplåt. Korrosionen hos anoderna orsakad av strömbelastning ökade alltså 6,3 gånger när arean hos katodplåtarna ökade 10 gånger.

Egenkorrosion hos anoden var $31 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med liten provplåt i fyllningsjord och $33 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med stor provplåt. Egenkorrosionen hos anoderna var alltså strängt taget oberoende av katodplåtarnas area. En förklaring till detta kan vara att fränslagspotentialerna hos anoden i siltig lera var tämligen lika oavsett koppling till liten eller stor katod i fyllningsjord.

För anoderna i luftningscellen var egenkorrosionen större än korrosionen orsakad av strömbelastning. Egenkorrosionen hos anoderna var 6,7 gånger större än korrosion orsakad av strömbelastning vid hopkoppling med liten plåt i fyllningsjorden, men endast 1,1 gånger större vid hopkoppling med stor provplåt. Egenkorrosionen, 31 respektive $33 \mu\text{m}/\text{år}$, var mer än dubbelt så stor som korrosionshastigheten i okopplat tillstånd ($14 \mu\text{m}/\text{år}$).

I undersökningen har det visats att luftningsceller kan uppkomma i fält. Det är en viktig slutsats från fältförsöken.

1 Bakgrund

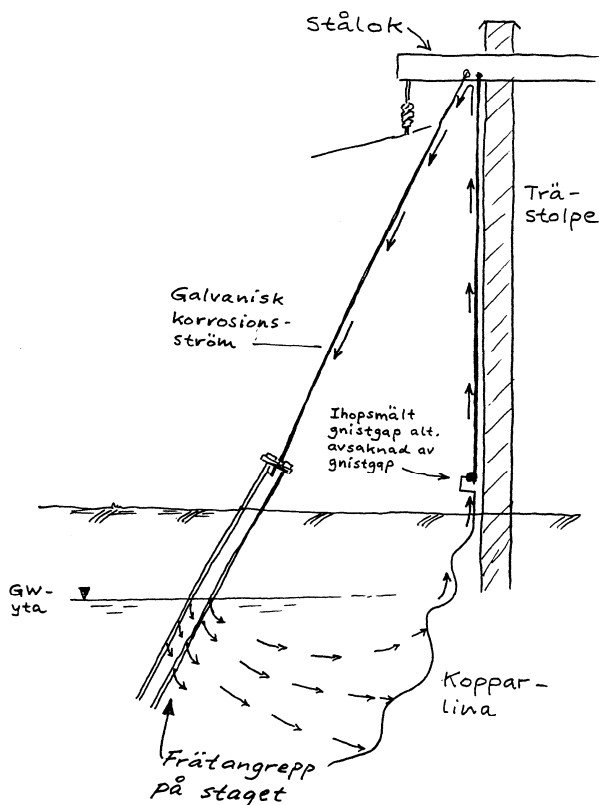
Många master och stolpar, till exempel för kraftledningar, är stagade med förankringsstag som är nedgrävda i jorden. Staget är av varmförzinkat stål och går ned vertikalt i jorden till cirka 2 meters djup.

Det är mycket viktigt att staget inte rostar av. Under senare år har det rapporterats om kraftiga korrosionsangrepp på stag som ibland helt rostat av.

Man kan misstänka att korrosionsorsaken i en del fall varit att grundvattenytan har stått mot staget och att det därigenom uppkommit en korrosionscell av typen luftningscell. Denna cell har medfört att korrosionsangreppet blivit koncentrerat till staget kring grundvattenytan. Det är dock oklart exakt var angreppen inträffat i förhållande till grundvattenytan.

En annan viktig orsak till korrosion på förankringsstag till kraftledningsstolpar är galvanisk korrosion (bimetallkorrosion). Den galvaniska korrosionen orsakas av att staget är i elektrisk kontakt med jordningslinor av koppar.

I praktiken torde dessa två korrosionsorsaker samverka, se **figur 1**.



Figur 1. Korrosion på förankringsstag på kraftledningsstolpar.

2 Syfte

Avsikten med detta projekt var att experimentellt undersöka det korrosionsförhållande, som råder på vertikala stålkonstruktioner nära grundvattenytan med och utan kontakt med koppar. Intresset för en sådan undersökning har bland annat väckts av de korrosionsangrepp, som uppstått på förankringsstag till kraftledningsstolpar.

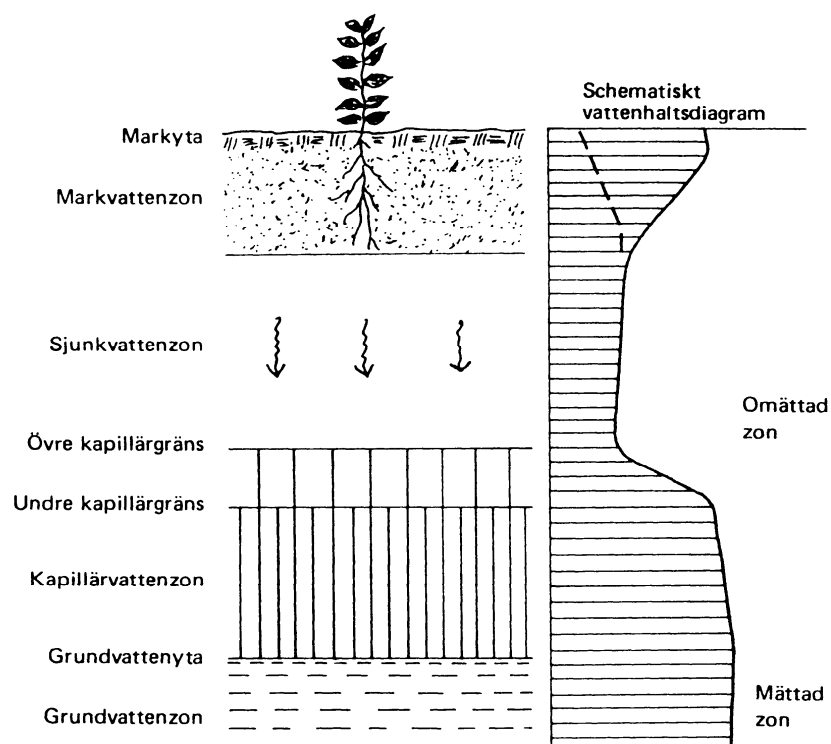
3 Vattenförekomst i jord

Jorden kan indelas i två zoner avseende vattenförekomst:

- * Omättad zon
- * Mättad zon.

I den mättade zonen är jorden vattenmättad, det vill säga hela den tillgängliga porvolymen är vattenfylld (den volymbaserade vattenhalten svarar mot jordens porositet). I den omättade zonen är porerna fyllda med vatten och jordluft (den volymbaserade vattenhalten är mindre än vad som svarar mot jordens porositet). Porvattnet i den omättade zonen kallas markvatten.

Av särskilt stor betydelse är grundvattenytan. Under denna är jorden vattenmättad. Jorden är också vattenmättad en bit över grundvattenytan, upp till den undre kapillära stighöjden eftersom vatten transporteras uppåt genom kapillär stigning, se **figur 2**.



Figur 2. Vattnets förekomst i jorden. Vattenhalten i rotzonen (markvattenzonen) varierar kraftigt. Den heldragna linjen i vattenhaltsdiagrammet för markvattenzonen motsvarar förhållanden strax efter nederbörd och den streckade linjen förhållanden efter en längre torrperiod. Figur från Svensson [1].

Det finns två undre kapillära höjder i jorden: undre kapillära höjden vid stigning av vatten (vätande betingelser) och undre kapillära höjden vid dränering av jorden (torkande

betingelser). Kapillära höjden (både övre och undre höjden) vid stigning är lägre än den vid dränering. Den kapillära höjden varierar mycket kraftigt med jordarten, se **tabell 1**.

Tabell 1. Undre kapillära höjden vid dränering för olika jordarter.
Data från Fagerström & Wiesel [2].

Jordart	Kapillär höjd (m)	
	Lös lagring	Fast lagring
Grovsand	0,03 - 0,12	0,04 - 0,15
Mellansand	0,10 - 0,35	0,12 - 0,50
Finsand	0,3 - 2,0	0,4 - 3,5
Grovsilt	1,5 - 5	2,5 - 8
Mellansilt - finsilt	4 - 10	6 - 12
Lera	> 8	> 10

Den kapillära höjden är mycket stor i finkornig jord och då särskilt i lera. Detta innebär att i finkornig jord är jorden nästan helt vattenmättad en relativt lång sträcka över grundvattenytan. Åtminstone är nedre delen av kapillärzonen nästan helt vattenmättad. I den övre delen av kapillärzonen avtar vattenhalt successivt med avståndet till grundvattenytan.

Vattnets förekomst i jorden kan mer precist indelas i olika zoner (**figur 2**):

- * Rotzon (markvattenzon)
- * Sjunkvattenzon (kallas också för intermediär zon)
- * Kapillärzon
- * Grundvattenzon.

Rotzonen sträcker sig från markytan till växternas nedre rötter. Området mellan rotzonen och kapillärvattenzonen kallas för sjunkvattenzonen. Vattnet i denna zon transporteras nedåt som sjunkande kapillärt vatten eller sjunkande fritt vatten. Kapillärvattenzonen sträcker sig från grundvattenytan upp till den övre kapillära höjden för jordarten. Det finns också två övre kapillära höjder: vid stigning av vatten och vid dränering av vatten. I grundvattenzonen är jorden alltid vattenmättad och porvattnet kallas för grundvatten.

Grundvattenytans läge kan bland annat lokaliseras med mätning av portrycket (porvattnets tryck) i jorden. Portrycket mäts relativt atmosfärstrycket på olika djup i jorden. I grundvattenytan är portrycket lika med atmosfärstrycket (portrycket u är lika med noll). Under grundvattenytan är portrycket större än atmosfärstrycket ($u > 0$, positivt portryck) och över grundvattenytan är portrycket mindre än atmosfärstrycket ($u < 0$, negativt portryck).

I litteraturen finns olika syn på om kapillärvattenzonen skall räknas till den omättade zonen eller till den mättade zonen. I kapillärvattenzonen är jorden nästan helt vattenmättad, men portrycket är mindre än noll (negativt portryck).

Det finns en populär föreställning om två olika fuktillstånd i jorden, ”blött” under grundvattenytan och ”torrt” över grundvattenytan. Denna bild stämmer inte för finkornig jord med hög kapillär höjd (mäktig kapillärzon). Föreställningen stämmer något bättre i grovkornig jord med liten kapillär höjd (liten kapillärzon).

Grundvattenytan uppträder inte som en distinkt yta i jorden och grundvattenytans läge kan bestämmas genom:

- * Mätning i öppna rör
- * Mätning i rör med filterspets
- * Mätning av portryck i jorden.

Mätning av grundvattennivå beskrivs i referens [3, 4]. I grovkornig jord (sand, grus och grovkornig morän) kan grundvattennivån mätas i ett öppet rör, medan i finkornig jord (silt, lera och finkornig morän) sker mätning i rör med filterspets eller med portrycksmätare. I finkornig jord är det inte tillförlitligt att mäta vattennivån i en grävd provgrop, eftersom en stor del av vattnet i gropen är så kallat sprickvatten, det vill säga infiltrerat nederbördsvatten i torrskorpans sprickor och hålrum [4].

Grundvattennivåns läge bestäms av grundvattenbildningens storlek och av vattengenomsläppligheten hos jorden och berggrunden. Grundvattenbildningen påverkas i sin tur av klimatförhållanden samt av vegetation, topografi och geologiska förhållanden på platsen. För morän- och urbergsterräng ligger grundvattennivån vanligen ytligt beroende på relativt stor grundvattenbildning och relativt låg vattengenomsläpplighet i jord och berg.

Grundvattennivån fluktuerar på ett naturligt sätt och variationerna kan indelas i [5]:

- * Korttidsvariationer
- * Årstidsvariationer
- * Flerårsvariationer.

Årstidsvariationen är viktigast med hög grundvattennivå på våren i samband med snösmältningen, sjunkande nivå under sommaren och återigen ökande grundvattennivå under hösten i samband med höstregn. Under vintern sjunker grundvattennivån fram till snösmältningen.

Flerårsvariationer beror på fleråriga klimatväxlingar. Ett exempel är grundvattensänkning till följd av flera nederbördsfattiga år.

Korttidvariationer är som namnet antyder små variationer under korta tidsintervall. Korttidvariationerna kan indelas i direkta och indirekta faktorer.

Till de direkta kan räknas:

- * Kortvariga nederbörds- och torrperioder
- * Avdunstning
- * Förändringar i närbelägna ytvattenmagasin (hydraulisk kontakt mellan grundvattenmagasin och ytvattenmagasin).

Till de indirekta faktorerna hör:

- * Variation i tyngdaccelerationen
- * Ändring i lufttrycket.

Storleken på de årstidsvisa fluktuationerna hos grundvattennivån beror på vattengenomsläppligheten hos jorden och berggrunden, den omättade zonens mäktighet samt mark- och grundvattenmagasinens storlek. För den vanligaste jordarten i Sverige, sandig morän (sandig-moig morän), blir fluktuationerna stora, omkring 1 – 3 m. Detta beror på låg vattengenomsläpplighet, ytlig grundvattennivå och litet grundvattenmagasin. I sand och särskilt i grus blir fluktuationerna små.

För en mer detaljerad beskrivning av vattenförhållandena i jord hänvisas till handböcker av Knutsson & Morfeldt [5] och Grip & Rodhe [6].

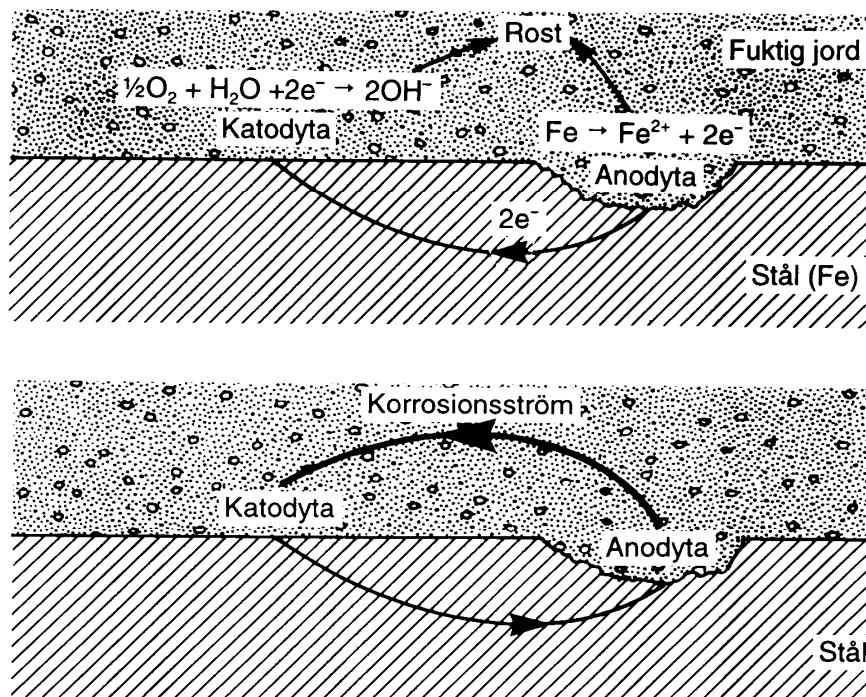
4 Allmänt om korrosion i jord

Jordkorrosion sker under inverkan av jordens och mark- och grundvattnets kemiska och fysikaliska egenskaper. För att korrosion skall uppstå krävs närvaro av syrgas (O_2) och fuktig jord vid stålytan. Små vattenfyllda porer mellan jordpartiklarna försvårar syrets transport fram till stålytan och därmed blir korrosionen mindre. En förklaring till de låga korrosionshastigheterna som konstaterats på stålplåtar i naturligt lagrad jord är att syrets transporthastighet i denna är betydligt lägre än i omlagrad jord, speciellt i lerjord där pålning är vanligt förekommande.

4.1 Korrosionens elektrokemiska natur i jord

Vid korrosion uppträder anodiska (ödlare) och katodiska (ädlare) partier på metallytan. På anod- och katodytorna sker olika kemiska reaktioner. Dessa leder till att själva korrosionsangreppet uppstår på anodytan, medan korrosionen motverkas på katodytan.

Anodytan, katodytan och den fuktiga jorden bildar tillsammans en korrosionscell. Korrosionscellen ger upphov till en elektrisk ström, den så kallade korrosionsströmmen, som flyter genom jorden från anodytan till katodytan. Ju större korrosionsström, desto högre korrosionshastighet, se **figur 3**.



Figur 3. Korrosionscell på stål i jord eller vatten. Övre bilden visar de elektrokemiska reaktionsförloppen. Nedre bilden visar korrosionsströmmens väg i samma korrosionscell.

Är katodytorna stora och anodytorna små blir korrosionsangreppen koncentrerade, så kallad lokal korrosion. Är däremot anod- och katodytorna ungefär lika stora och jämnt

fördelade uppstår en jämn avfrätning över en större yta. Denna så kallade jämna eller allmänna korrosion är oftast betydligt långsammare än den lokala korrosionen.

Av avgörande betydelse för korrosionshastigheten på underjordiska metallkonstruktioner är som nämnts tillförseln av syre till metallytan. Kan syre inte transporteras till metallytan sker korrosionen normal mycket långsamt. Är syrgastillförseln hindrad till endast vissa delar av metallytan kan dock lokal korrosion uppstå till följd av att så kallade luftningsceller bildas.

Vidare är jordens elektriska ledningsförmåga (konduktivitet) av betydelse för korrosionshastigheten vid galvanisk korrosion och korrosion orsakad av luftningsceller. Är ledningsförmågan god (låg jordresistivitet) flyter korrosionsströmmarna lätt och korrosionshastigheten kan bli hög.

4.2. Inverkan av jordens vattenhalt på korrosionen

Vattenhalten i jorden har en mycket stor inverkan på korrosionshastigheten hos kolstål. Vid laboratorieundersökningar i sand (Fylesand 65 användes i undersökningen liksom i den här redovisade undersökningen) vid Korrosionsinstitutet av Sederholm, Svensson & Vinka [7], framkom att maximal jämn och lokal korrosionshastighet på kolstål uppstod vid en viss, för korrosionen, optimal vattenhalt på cirka 6 mass-% (som motsvaras av vattenkvoten 6,4 mass-%, den volymbaserade vattenhalten 10 vol-% och vattenmättnadsgraden 27 vol-%).

Vid högre och lägre vattenhalt än 6 mass-% minskade både den jämna korrosionen och den lokala korrosionen. Att döma av laboratieförsöken blir korrosionen successivt mer katodiskt reglerad från vattenmättnadsgraden 27 vol-% till vattenmättnad av jorden. Korrosionshastigheten blir vid katodisk reglering begränsad av transporthastigheten för syrgas genom jorden fram till metallytan.

Korrosionen hos kolstål har undersökts i fyllningsjord i stadsmiljö i Göteborg i ett samarbetsprojekt mellan Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg och Korrosionsinstitutet [8, 9, 10, 11, 12]. I projektet mättes regelbundet en gång i veckan på tre olika djup jordens vattenhalt med tensiometrar samt korrosionshastigheter hos kolstål dels som momentan korrosionshastighet med linjär polarisationsteknik (LPR-sonder), dels som ackumulerad avfrätning med elektrisk resistansteknik (ER-sonder). Vid dessa mätningar upptäcktes årtidsberoende skillnader i korrosionshastighet. Högst korrosionshastighet mättes under sommarmånaderna med lägst vattenhalt. Perioder med mycket hög korrosionshastighet under sommarmånaderna har till stor del kunnat sättas i samband med mycket kraftiga regn.

För vertikala konstruktioner är vid korrosionsbedömning den maximala genomsnittliga korrosionshastigheten i ett visst tvärsnitt utslagsgivande [13, 14].

Vid undersökningar vid Vattenfall, Vällingby av Troselius [13, 14] har det framkommit att grundvattennivåns läge har stor betydelse för korrosionsangreppets lokalisering. En utpräglad korrosionszon uppkommer där provstängerna passerar grundvattenytan. Detta gäller för stänger av såväl kolstål som av varmförzinkat kolstål. Om grundvattennivån

ligger konstant nära markytan, det vill säga i ”markbandet” (de översta decimetrarna av jordprofilen) erhålls en skarp korrosionszon. Om däremot grundvattennivån varierar under året sprids korrosionsangreppet ut över en bredare korrosionszon. Det minsta angreppet erhålls om grundvattennivån hela året ligger helt under konstruktionen.

Troselius [14] anger följande korrosionshastigheter för kolstål i morän och torv. Korrosionshastigheten avser maximal genomsnittlig korrosionshastighet i korrosionszonen, se **tabell 2**.

Tabell 2. Korrosionshastigheter för kolstål och zinkskiktet på varmförzinkat stål för vertikalt placerade konstruktioner i sandig morän och torv. Data från Troselius [14].

Grundvattennivåns läge	Korrosionshastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$)			
	Kolstål		Zinkskikt	
	Morän	Torv	Morän	Torv
I "markbandet"	15	40	10	15
Varierande grundvattennivå	10	30	5	8
Under konstruktionen	5	–	1	–

5 Tekniskt utförande

5.1 Allmänt

Undersökningen bestod av tre försök. Den principiella försöksuppställningen har tidigare beskrivits av Sederholm, Svensson & Vinka [7]. Vid försöken placerades prover av stål och i ett försök också kopparstänger i cylindriska kärl. Kärlen var av plexiglas med finmaskiga trådnät i botten. Kärlen fylldes med sand och ställdes i ett yttre plastkärl, se **figur 4**. Det yttre kärlet fylldes med vatten varvid jorden i provkärlet fuktades genom kapillärl stigning. Provcylindrarna hade dimensionerna: höjd 330 mm och invändig diameter 110 mm.

5.1.1 Försök 1: Okopplade provplåtar

Försöket syftade till att bestämma korrosionens storlek vid olika vattenhalter kring grundvattenytan. I detta försök placerades provplåtar på fem olika nivåer i ett provkärl. Dessutom placerades tre vertikala provstänger i kärlet.

5.1.2 Försök 2: Kopplade provplåtar

Försöket syftade till att avgöra korrosionsangreppens storlek på olika delar av en vertikal stålkonstruktion vid olika vattenhalter kring grundvattenytan. Provplåtar placerades på fem olika nivåer i kärlet. För att ur korrosionssynpunkt efterlikna en vertikal stång kopplades provplåtar samman i en kopplingsplint utanför kärlet. Även här användes fristående vertikala provstänger som referenser.

5.1.3 Försök 3: Galvanisk korrosion

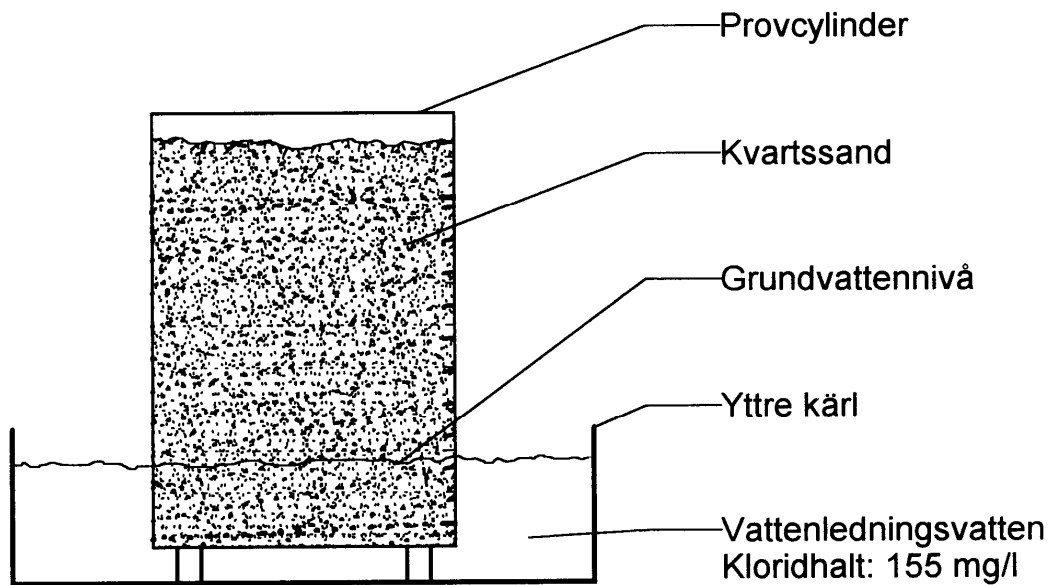
Detta försök avsåg att ta reda på korrosionsangreppens storlek och natur på en vertikal stålkonstruktion i kontakt med en kopparkonstruktion vid olika vattenhalter kring grundvattenytan. I kärlet kopplades provstänger av stål samman med provstänger av koppar. Stängerna av stål och koppar var lika stora. En fristående vertikal provstång av stål användes som referens, för att kunna fastställa korrosionshastigheten utan galvanisk påverkan från kopparstången.

5.1.4 Mätningar

Försöken pågick i 56 dygn och under tiden mättes korrosionspotentialerna för varje enskild provplåt i kärl 1 (försök 1) och för stålstångerna i kärl 1 och 2 samt för den okopplade stålstången i kärl 3 (försök 3). Frånslagspotential uppmättes för de kopplade provplåtarna i kärl 2 (försök 2) samt för de kopplade stål- och kopparstångerna i kärl 3. Korrosionsströmmarna uppmättes också mellan provplåtarna i kärl 2 samt mellan stål- och kopparstångerna i kärl 3. Vid undersökningens slut togs jordprover ut på olika nivåer i kärlet för bestämning av vattenhalter.

a)

Fuktning av jord



b)



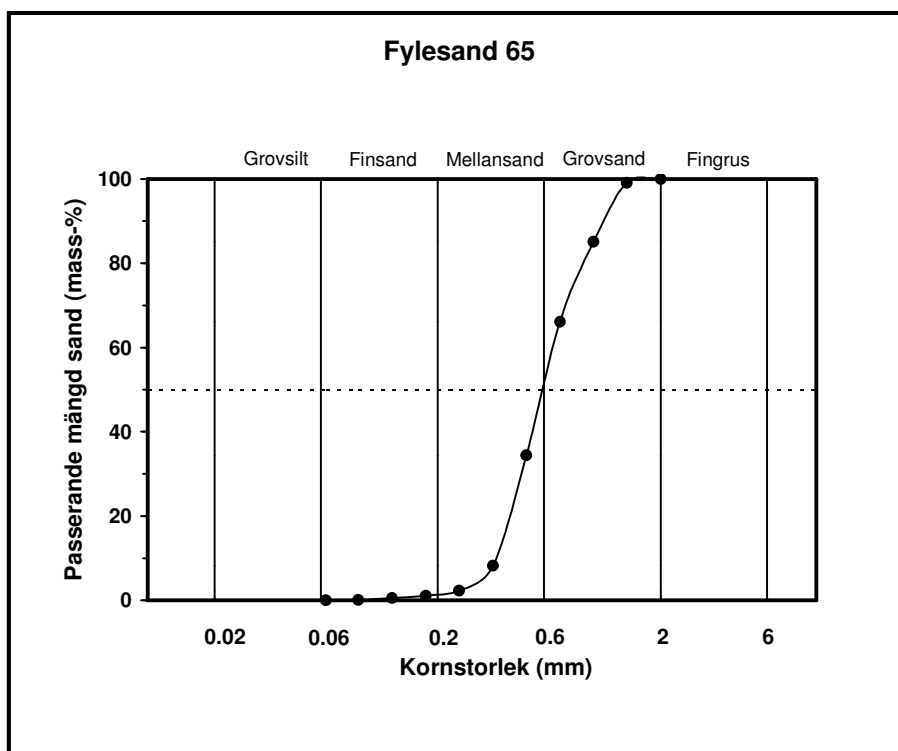
Figur 4. Fuktning av jorden i provcylindrar.

- a) Schematisk bild av fuktning av jorden i provcylinder.
- b) Tre provcylindrar (försök 1, 2 och 3), som står i ett yttre kärl med provlösning.

5.2 Försöksjord och provlösning

Som jord användes en viss sorts sand, som man genom tidigare erfarenheter på Korrosionsinstitutet [7] visste var lämplig för korrosionsundersökningar på laboratorium. Sanden som användes var Fylesand 65 (leverantör: Fyleverken Industrimineralberednings AB, Sjöbo) och den benämns ensgraderad (sorterad) mellansandig grovsand. Kornstorleksfördelningen för sanden framgår av **figur 5** och den kemiska sammansättningen av **tabell a** i bilagan. Sanden bestod av 99,4 mass-% kiseldioxid (SiO_2). Med pulvverröntgendiffraktionsundersökning, som utfördes vid Avdelningen för oorganisk kemi, Ångströmlaboratoriet (numera Institutionen för materialkemi, Ångströmlaboratoriet), Uppsala universitet, konstaterades att kiseldioxiden bestod av (låg)kvarts $\alpha\text{-SiO}_2$. Varje kärl innehöll 4,5 kg torr sand.

Vattnet, som användes i undersökningen, var Stockholms kommunala vattenledningsvatten. För kemisk analys se **tabell b** i bilagan, med tillsats av natriumklorid (NaCl). Tillsatsen var 221 mg NaCl/ℓ vatten, vilket gav en kloridhalt på 134 mg/ ℓ . Eftersom tappvattnet innehåller 20 mg Cl^-/ℓ , blev den totala kloridhalten cirka 155 mg Cl^-/ℓ . Anledningen till klorid tillsatsen var att korrosionshastigheten skulle ökas. Sanden mättades först med provlösningen varpå den torkades.



Figur 5. Kornstorleksfördelning för Fylesand 65. Data från siktanalys vid Fyleverken Industrimineralberednings AB, Sjöbo.

5.3 Material och provutformning

Provplåtar och provstänger tillverkades av kallvalsat stål, med beteckning FeP06 enligt den nu indragna svenska standarden SS-EN 10130, som tillhandahölls av SSAB Tunnpå AB, Borlänge. Det använda stålet motsvaras nu av stål med beteckning DC06 och stålnummer 1.0873 enligt svensk standard SS-EN 10130:2006 [15]. Stålets sammanställning framgår av **tabell c** i bilagan.

Stålet är ett lågkolhaltigt aluminiumtätat (heltätat) mjukt stål, som klassas som ett legerat kvalitetsstål enligt svensk standard SS-EN 10130:2006 och inte som ett olegerat stål eller kolstål eftersom titanhalten är lika med eller överstiger gränsvärdet 0,05 mass-%, som anges i svensk standard SS-EN 10020 [16]. Gränsdragning mellan olegerat och legerat stål, baserad på chargeanalys, sker med hjälp av gränsvärden för olika legeringsämnen. Titanhalten i det använda stålet var 0,088 mass-% (**tabell c** i bilagan). Typiskt värde på titanhalten i stålet DC06 är 0,065 mass-% [17]. Med legerat kvalitetsstål menas enligt svensk standard SS-EN 10020 ”Stål som har fordringar för t ex. slagseghet, kornstorlek, eller formbarhet”. Mjukt stål används när formnings- och pressningsegenskaperna är viktigare än hållfasthetsegenskaper. Formbarheten sjunker med ökande hållfasthet.

Stålet DC06 är avsett för kallformning och levereras som tunnpå och stålet beskrivs som ”Stålsort för avancerad formning med bästa pressbarhet vid såväl drag- som sträckpressning” [17]. Kol och kväve skall vara helt bundna i stålet [15]. Titan, som är en effektiv karbid- och nitridbildare, har därför tillsatts som legeringsämne med mycket lågt halt. Bland annat genom tillsatsen av titan blir stålet åldringströgt. Risken för så kallade flytfigurer, fel på ytan hos en formad produkt, har därför eliminerats.

Stålet DC06 har mycket låga halter av legeringsämnen och kan klassas som ett låglegerat stål. Det skall poängteras att stålet DC06 på intet vis har bättre korrosionshårdighet än ett ordinärt kolstål.

Stål med låg legeringsnivå, mikrolegerade stål (finkornsbehandlade kolstål med små tillsatser av aluminium, vanadin och niob, som ger stålet en förhöjd sträckgräns) och låglegerade stål, har i allmänhet inte bättre korrosionshårdighet än ordinärt kolstål.

Ett undantag är rosttröga stål, som har bättre korrosionshårdighet än kolstål i vissa atmosfärsmiljöer [18, 19, 20]. Rosttrögt stål enligt svensk standard SS-EN 10025-5:2004 [21] är ett låglegerat stål med små legeringstillatser av krom, koppar, kisel och fosfor samt ofta också nickel. Rosttrögt stål fungerar bäst för konstruktioner utomhus, som omväxlande utsätts för fuktning och torkning och bör inte användas på konstruktioner, som ständigt är fuktiga och i närheten av hav. I **jord och vatten** har rosttrögt stål inte bättre korrosionshårdighet än kolstål, utan rostar lika mycket som ett vanligt kolstål.

Plåttjockleken var 0,6 mm. Varje provplåt hade formatet 50 x 25 mm och således en exponerad area på 26 cm² (kanter inräknade). Stängernas dimension var 10 x 275 mm och exponerade arean 58 cm². Samtliga plåtar och stänger hade en flik för kabelanslutning. Proverna och ångavfettades med trikloretylen, varefter de vägdes med analysvåg. Efter vägningen anslöts kablarna till provflikarna. Som kontakter användes kabelskor som trädde på provflikarna. På stängerna skruvades kontakterna fast i ena änden. Till kabel-

skorna anslöts kablarna genom klämning med kabelång. Kontakter och provflikar isolerades med krympslang som slutligen täcktes med vulkaniseringstejp.

I försök 3 användes stänger av fosfordesoxiderad koppar, koppar SS 50 15-4 enligt den nu indragna svenska standarden SS 14 50 15, som tillhandahölls av Outokumpu Copper AB, Västerås. Den använda kopparen motsvaras nu av koppar med symbol Cu-DHP och nummer CW024A enligt svensk standard SS-EN 1652 [22]. Koppars sammansättning framgår av **tabell c** i bilagan. Stängernas dimension var 10 x 275 mm med tjockleken 1 mm och den exponerade arean var 58 cm². Kablar fästes på kopparstängerna på samma sätt som på stålet.

5.4 Provplacering

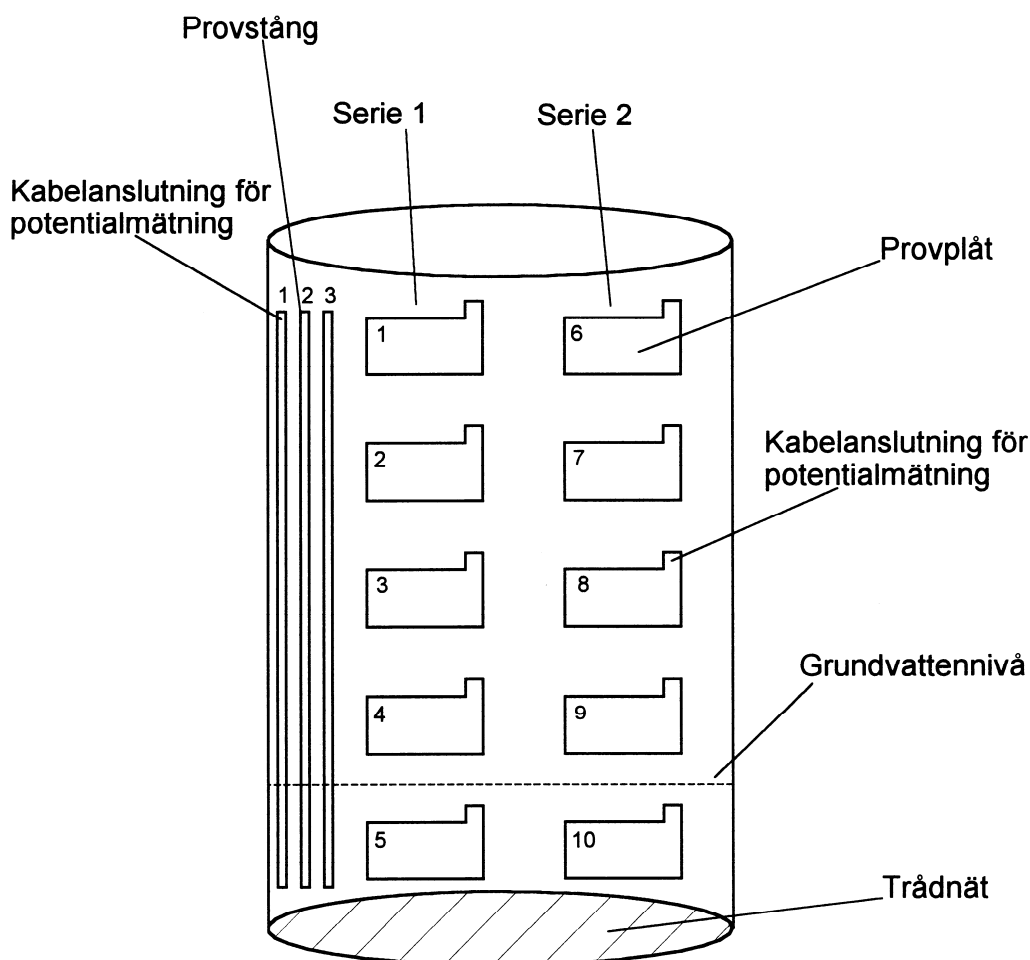
5.4.1 Provnivåer

Provplåtar placerades på 5 olika nivåer (*nivå 1* till *5*) i provkärlen. *Nivå 1* fanns högst upp i kärlet och *nivå 5* längst ned i kärlet. Jorden på *nivå 5* var vattenmättad och vattenhalten minskade därefter successivt för provnivåer högre upp i kärlet. På *nivå 1* var jorden "torr" med mycket låg vattenhalt. Vid vattenmättnad var vattenhalten drygt 19 mass-% och vattenkvoten knappt 24 mass-%.

5.4.2 Försök 1 med okopplade plåtar

I provkärlet placerades 10 provplåtar samt 3 provstänger. Provplåtarna placerades i två parallella serier med 5 plåtar i varje (serie 1 och 2), där varje plåt var fristående från de övriga. Provstängerna placerades vertikalt i kärlet och var fristående från varandra. Avståndet mellan plåtarna i vertikal riktning var 35 mm och avståndet från botten var liksom för stängerna 20 mm. Avståndet från jordytan "markytan" till provplåtarnas övre kant var 50 mm och 20 mm till övre kanten på provstängerna. En schematisk bild av arrangemanget med provplåtar och provstänger visas i **figur 6**.

Provkärl med okopplade plåtar

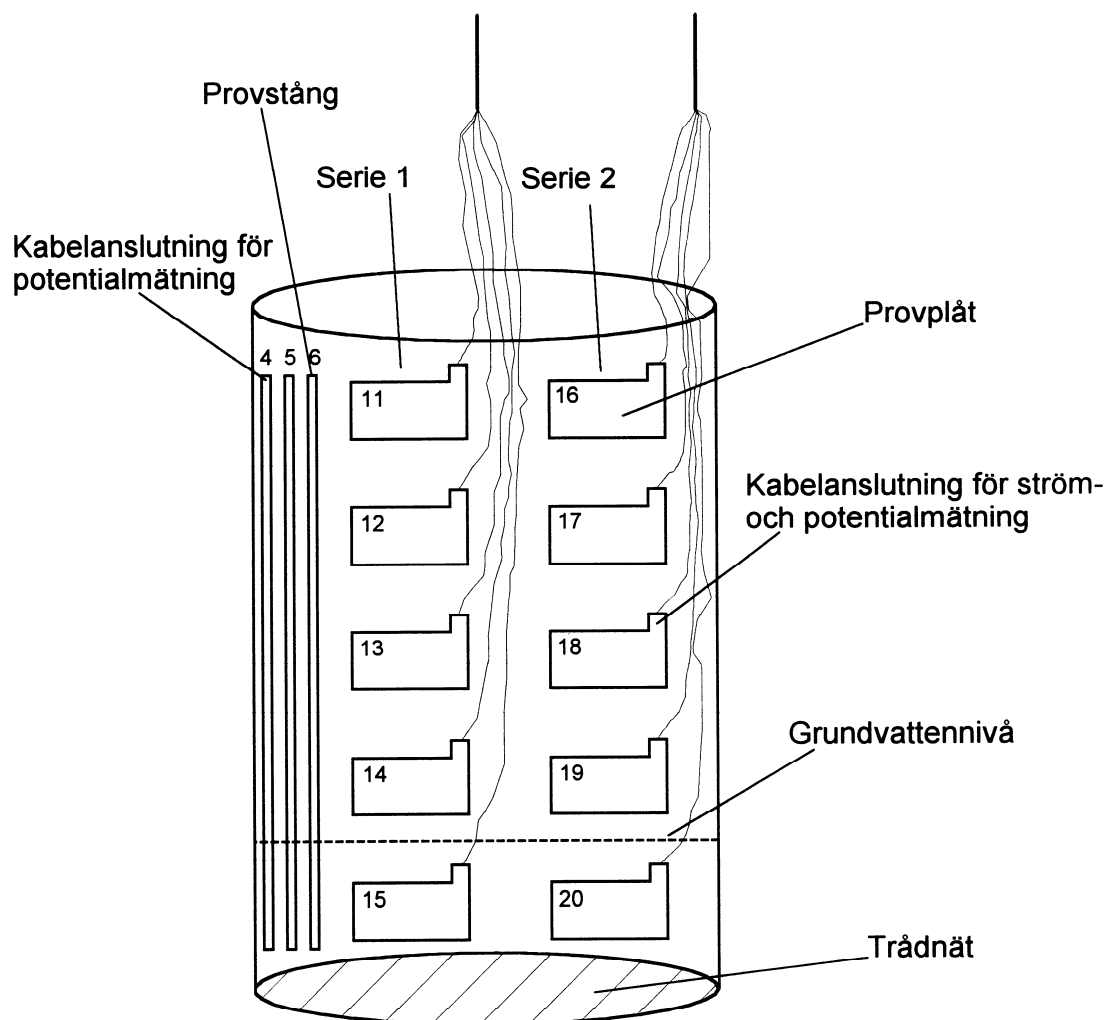


Figur 6. Schematisk bild av försöksupställning 1.

5.4.3 Försök 2 med hopkopplade plåtar

Försöket hade samma utformning som försök 1, med skillnaden att provplåtarna inom varje serie var hopkopplade för att korrosionsströmmarna skulle kunna flyta fritt mellan dem på samma sätt som genom en provstång. De tre vertikala provstångerna var fristående och inte sammankopplade. En schematisk bild av arrangemanget med hopkopplade provplåtar och provstänger visas i **figur 7**.

Provkärl med kopplade plåtar

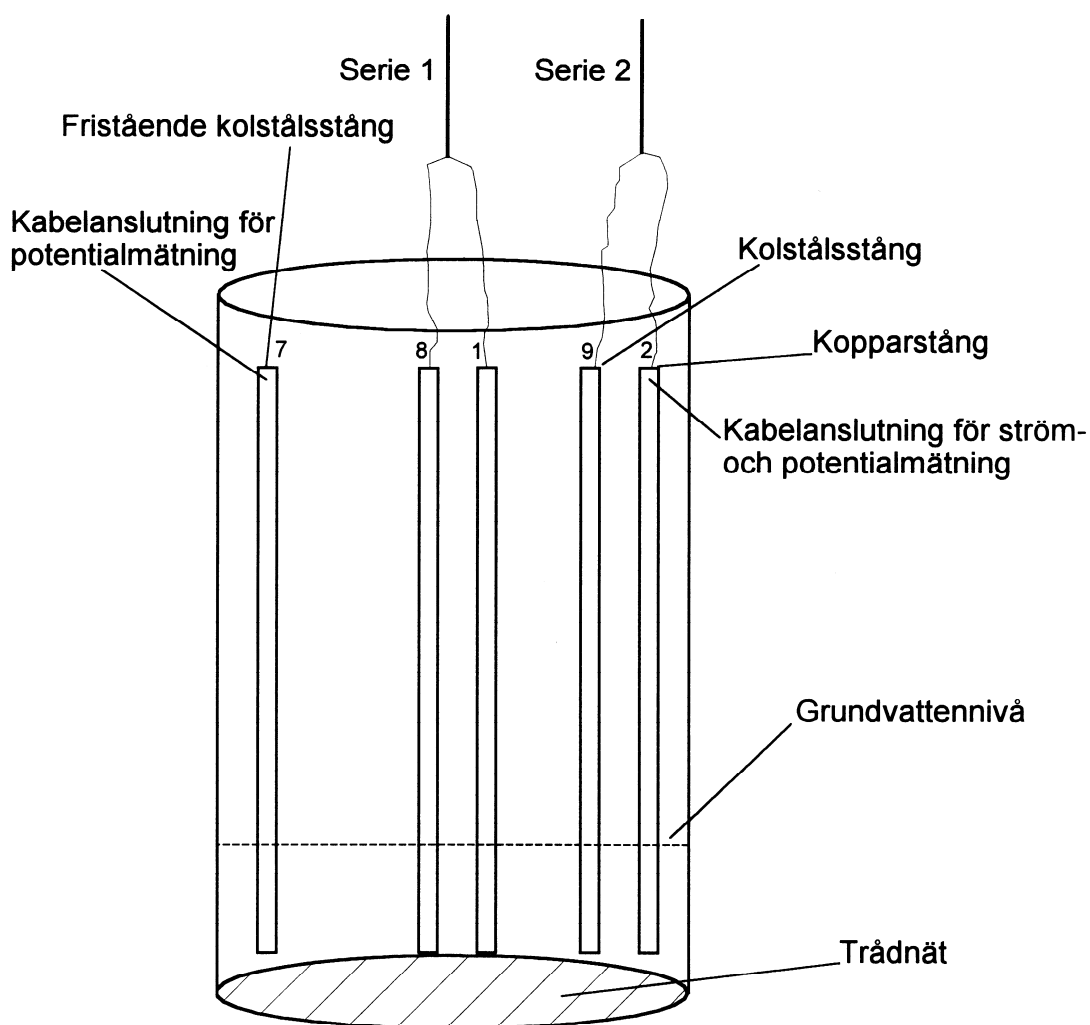


Figur 7. Schematisk bild av försöksupställning 2

5.4.4 Försök 3 med galvanisk korrosion

I provkärlet kopplades en stålstång samman med en kopparstång i två parallellprov (serie 1 och 2). Stål- och kopparstångerna var lika stora, det vill säga areaförhållandet var 1:1. För att kunna mäta korrosionshastigheten hos stålet utan galvanisk påverkan från kopparn fanns det också en inte hopkopplad stålstång i kärlet. Avståndet från jordytan "markytan" till provstångernas övre kant var 20 mm och avståndet från botten på provcylindern till provstångernas nedre kant var 20 mm. En schematisk bild av arrangementet med stängerna visas i **figur 8**.

Galvanisk korrosion

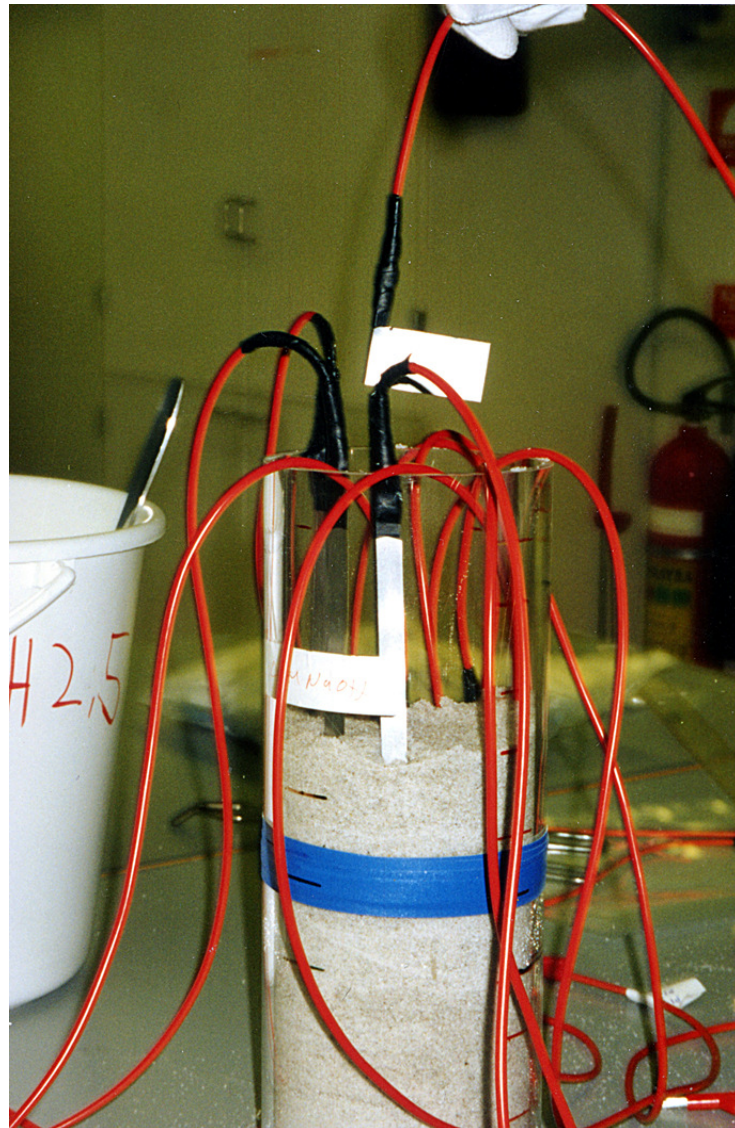


Figur 8. Schematisk bild av försöksupställning 3.

5.5 Fuktning av jorden

Det yttre plastkärlet fylldes med provlösning till en bestämd nivå. Provkärnen placerades sedan i det yttre kärlet. Vid försökets inledning fuktades jorden lätt från ovan med provlösning, varpå kärnen täcktes över med plastfolie. Kärnen fick sedan stå orörd i 4 dygn för att provlösning skulle hinna stiga upp från det yttre kärlet och ställa in sig i varje provkärn. På grund av kapillär stigning i den fina sanden kom vattnet som beräknat att stiga högre i kärnen än "grundvattennivån" i det yttre kärlet. För att minska avdunstningen övertäcktes det yttre kärlet med plastfolie. För att kompensera för den avdunstning som dock förekom, fylldes det yttre kärlet regelbundet på med avjoniserat vatten. **Figur 9** visar en bild av försöksupställningen.

a)



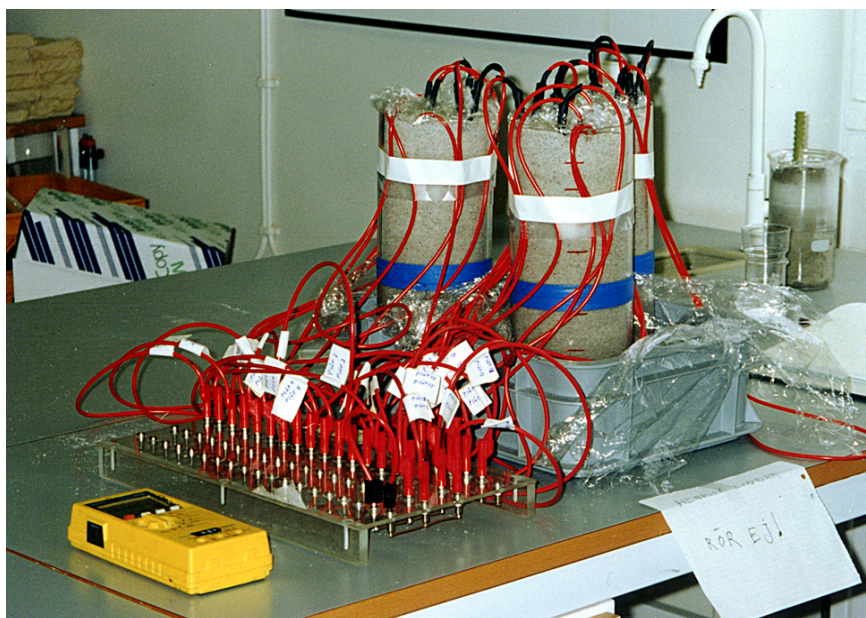
Figur 9. Försöksupställning.

- a) Utplacering av provplåtar med kabel i provcylinder vid försök med hopkopplade provplåtar (försök 2).

b)



c)



Figur 9. Försöksupställning.

- b)** Fyllning av provcylinder med kvartssand vid försök med hopkopplade provplåtar (försök 2).
- c)** Provkärl med tre stående provcylindrar samt mätplint och multimeter.

6 Mätningar

6.1 Vattenhalt, vattenkvot och vattenmättnadsgrad

Vid undersökningens slut togs jordprover vid varje provnivå i samtliga kärl för bestämning av vattenmängden. Jorden avlägsnades försiktigt på varje nivå och vägdes omedelbart. Sedan torkades jordproven under 1 dygn vid 105 °C. Därefter vägdes proven igen och vattenmängden bestämdes. Undersökningen utfördes enligt den nu indragna svenska standarden SS 02 71 16 [23].

I denna rapport uttrycks jordens vatteninnehåll på fyra olika sätt:

Vattenhalt (mass-%): vattenhalten är förhållandet mellan porvattnets massa och massan fuktig jord.

Vattenkvot (mass-%): vattenkvoten är förhållandet mellan porvattnets massa och massan torr jord.

Vattenhalt (vol-%): den volymbaserade vattenhalten är förhållandet mellan porvattnets volym och jordens skrymvolym. Skrymvolymen är jordens totala volym inklusive såväl öppna som slutna hålrum.

Vattenmättnadsgrad (vol-%): vattenmättnadsgraden är förhållandet mellan porvattnets volym och jordens porvolym. Porvolymen är den sammanlagda volymen av hålrummen mellan jordkornen. Dessa hålrum fylls av jordluft och porvatten.

Sandens porositet var 39 vol-%. Med porositet menas förhållandet mellan jordens porvolym (sammanlagd volym av hålrummen mellan jordkornen) och jordens skrymvolym (total volym hos jorden inklusive såväl öppna som slutna hålrum). Porositeten hos jorden beräknas enligt:

$$\varepsilon = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right)$$

där

ε = porositet, vol-%

ρ_d = torrdensitet (torr skrymdensitet), kg/m³

ρ_s = kompaktensitet, kg/m³

Torrdensiteten (kallas ibland för torr skrymdensitet) avser kvoten mellan jordens torra massa (massan av jordkornen inklusive slutna hålrum i kornen) och skrymvolymen (totala volymen hos jorden inklusive såväl öppna som slutna hålrum). Torrdensiteten hos jorden var 1610 kg/m³.

Med kompaktensitet avses kvoten mellan kompaktmassan (fasta fasens exklusive slutna hålrum i jordkornen) och kompaktvolymen (sammanlagd volym hos jordkornen ex-

klusive slutna hålrum i kornen). Kompaktdensiteten var 2620 kg/m^3 . Densitetsbestämningarna utfördes vid Avdelningen för hydroteknik, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.

Den massrelaterade vattenhalten kan omräknas till vattenkvot enligt:

$$w = \frac{100 \cdot v}{100 - v}$$

där

w = vattenkvot, mass-%

v = vattenhalt, mass-%

Volymbaserad vattenhalt beräknas utgående från vattenkvoten enligt:

$$\phi = \frac{\rho_d \cdot w}{\rho_w}$$

där

ϕ = volymbaserad vattenhalt, vol-%

ρ_d = torrdensitet, kg/m^3

w = vattenkvot, mass-%

ρ_w = vattnets densitet, kg/m^3

Vid beräkningarna av den volymbaserade vattenhalten användes densiteten 1000 kg/m^3 hos provlösningen.

Vattenmättnadsgraden beräknas från vattenhalten och porositeten enligt:

$$S = \frac{100 \cdot \phi}{\varepsilon}$$

där

S = vattenmättnadsgrad, vol-%

ϕ = vattenhalt, vol-%

ε = porositet, vol-%

6.2 Strömmätning

Strömmätningarna utfördes med en multimeter. För att kunna ta hänsyn till den inre resistansen hos amperemetern utfördes mätningar på två olika mätområden (6,67 respektive 666,7 Ω) och den verkliga strömmen beräknades.

Strömmar uppmättes från varje plåt i kärl 2 samt från stål- och kopparstängerna i kärl 3. Mätningarna utfördes genom att amperemetern anslöts parallellt med kabeln till respektive plåt/stång. Sedan bröts den ursprungliga förbindelsen så att all ström gick genom amperemetern.

6.3 Potentialmätning

Vid samtliga elektropotentialmätningar användes en mättad kalomelektrod (SCE) (Radiometer K 401) som referenselektrod och den erhållna elektropotentialen avsåg potentialskillnaden mellan elektroden (provplåten eller provstäng) och referenselektroden. Referenselektroden placerades i provlösningen i det yttre kärlet och anslöts till en voltmeter med hög ingångsimpedans. Tre typer av elektropotentialmätningar förekom:

Korrosionspotential, som uppmättes på samtliga fristående provstänger i kärnen samt de okopplade provplåtarna i kärl 1. Med korrosionspotential menas den korroderade metallens elektropotential.

Frånslagspotential, som uppmättes för var och en av plåtarna i kärl 2, samt för stål- och kopparstängerna i kärl 3. Frånslagspotentialen mättes när proverna frikopplades från varandra och visade bland annat om ett prov fungerade som anod eller katod när det var kopplat till övriga prov. Frånslagspotential avser elektropotential utan spänningsfall (IR-fall) i elektrolyten mellan referenselektroden och provplåten respektive provstäng. Vid mätning av frånslagspotential användes en multimeter och som potentialvärde togs det första spänningsvärde, som uppfattades när förbindelsen mellan provplåtar alternativt provstänger bröts.

Blandpotential, som uppmättes för stål- och kopparstängerna i kärl 3 då dessa fortfarande var hopkopplade med varandra. Blandpotentialen påverkas av båda hopkopplade metallerna, det vill säga av både stålet och koppars.

6.4 Betning

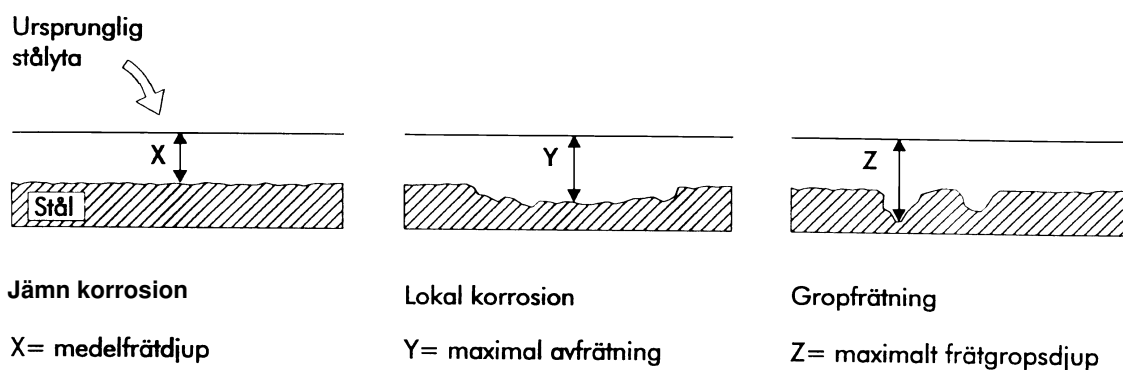
Betning innebär att man tar bort smuts och korrosionsprodukter från ett metallprov genom att doppa det en viss tid i ett betmedel, som väljs med hänsyn till metallen, till exempel ett syrabad med tillsats av korrosionsinhibitor. Betningen sker i flera omgångar med vägning mellan varje. Efter den första betningsomgången skall metallen vara fri från korrosionsprodukter och efter påföljande omgångar får man genom vägningen reda på hur mycket metall som fränts bort vid varje omgång. Genom linjär regression anpassar man en rät linje till massförlusten vid varje betomgång som funktion av bettiden.

Genom att extrapolera den räta linjen till bettiden noll får man fram massförlusten utan tillskott av metallupplösning vid betningen.

Betlösningen, som användes kallas för Clarkes lösning, och består av 20 g/l antimon(III)oxid (Sb_2O_3) och 70 g/l tenn(II)klorid-dihydrat ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) löst i koncentrerad saltsyra (HCl). Antimonoxiden fungerar som korrosionsinhibitor.

6.5 Korrosionshastighet

Korrosionen kan delas upp i jämn och lokal korrosion. Jämn korrosion (allmän korrosion) avser den genomsnittliga avfrätningen på ett föremål och sker med ungefär samma hastighet på hela ytan, medan lokal korrosion sker med särskilt stor hastighet inom begränsade områden på metallytan. Gropfrätning är lokal korrosion, som resulterar i frätgropar på metallytan, se **figur 10**. Gropfrätning, som också ibland kallas för punktfrätning eller punktkorrosion, leder till ett angrepp med ringa utbredning men ofta med betydande djup.



Figur 10. Olika former av korrosionsangrepp på kolstål.

6.5.1 Jämn korrosion

Jämn korrosionshastighet bestäms genom massförlustundersökningar där provföremålet vägs före och efter exponeringen, då korrosionsprodukterna avlägsnats genom betning. Korrosionshastigheten avseende massminskning per exponerad area och exponeringstid brukar anges i enheten $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$, som kan räknas om till medelavfrätning i enheten $\mu\text{m}/\text{år}$ ($1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$). Vid omräkning av korrosionshastigheten till medelavfrätning användes densiteten $7860 \text{ kg}/\text{m}^3$. Medelavfrätningen är alltså föremålets massminskning omräknad till utbredd avverkning av föremålet per tidsenhet. Medelavfrätningen är i dubbel bemärkelse en genomsnittlig korrosionshastighet: dels genomsnittlig korrosionshastighet för hela exponeringstiden, dels genomsnittligt frättdjup (medelfrättdjup) per tidsenhet på metallytan.

6.5.2 Lokal korrosion

Vid bestämning av maximal lokal korrosion uppmättes de två djupaste frätgroparna på varje sida på varje provplåt (totalt 4 mätvärden per prov) med mikroskop. Ur dessa värden bestämdes sedan maximal lokal korrosion enligt:

$$\text{Maximal lokal korrosion} = \text{Uppmätt maximalt frätdjup} + \text{Medelfrätdjup}$$

Den maximala lokala korrosionshastigheten erhöles genom division av frätdjupet motsvarande maximal lokal korrosion med exponeringstiden. Vidare kunde ur dessa data gropfrättningsfaktorn beräknas. Denna definieras enligt:

$$F = \frac{P_{\max}}{P_{\text{med}}}$$

där

F = gropfrättningsfaktor

P_{\max} = maximalt frätdjup, μm

P_{med} = medelfrätdjup, μm

6.5.3 Korrosion på grund av strömbelastning

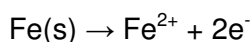
Vid korrosion orsakad av luftningsceller och galvanisk korrosion (bimetallkorrosion) kan den totala korrosionen delas upp i korrosion orsakad av strömbelastning och egenkorrosion:

$$\text{Total korrosion} = \text{Korrosion orsakad av strömbelastning} + \text{Egenkorrosion}$$

Med egenkorrosion menas korrosion utan påverkan av strömbelastning. Här är att märka att egenkorrosionen vid galvanisk korrosion eller vid korrosion orsakad av luftningsceller inte är samma sak som "vanlig" korrosion hos ett okopplat föremål som inte utsetts för galvanisk korrosion eller korrosion orsakad av luftningsceller.

För att kunna avgöra hur stor del av korrosionen (galvanisk korrosion) i kärl 2 och 3, som berodde på provernas hopkoppling (det vill säga korrosion orsakad av strömbelastning), användes resultaten från strömmätningarna. Strömmängden (Q) räknades ut varefter korrosionshastigheten erhöles med hjälp av Faradays lag.

Vid beräkningar med Faradays lag antogs att strömbelastningen gav upphov till endast en anodreaktion, som innebär upplösning av järn (Fe) till järn(II)joner (Fe^{2+}) under avgivning av elektroner (e^-):



Med Faradays lag beräknades massminskningen (m) och från massminskningen, exponeringstiden (t_{exp}) och exponerad area (A) kunde sedan korrosionshastigheten (v_{kor}) beräknas. Massminskningen beräknades enligt:

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M}{z \cdot F} = \frac{Q \cdot M}{z \cdot F}$$

där

m = massminskning, g

I = ström, A

t = tid, s

M = molmassa, g/mol; för järn är $M = 55,85$ g/mol

z = antal omsatta elektroner i elektrodreaktionen; i detta fall är $z = 2$

F = Faradays konstant, 96485 As/mol

Q = strömmängd, As

För med tiden varierande ström beräknades strömmängden (Q) som integralen av strömmen (I) som funktion av tiden (t) mellan tidpunkterna t_1 och t_2 :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

Integralen motsvaras av arean mellan strömkurvan och tidsaxeln i diagram med strömmen som funktion av tiden, **figur 13** för kopplade provplåtar och **figur 15** för försöken med galvanisk korrosion. Strömmen mättes vid fyra tillfällen: efter 5, 14, 34 och 48 dygns exponering. Vid beräkningarna antogs att strömmen varit konstant mellan försökets början och mätningen efter 5 dygn samt mellan mätningen efter 48 dygn och försökets slut vid 56 dygn. Korrosionshastigheten beräknades sedan enligt:

$$v_{\text{korr}} = \frac{m}{A \cdot t_{\text{exp}}}$$

där

v_{korr} = korrosionshastighet, g/(m²·s)

m = massminskning, g

A = exponerad area, m²

t_{exp} = exponeringstid, s

Den erhållna korrosionshastigheten på grund av strömbelastning omräknades därefter till medelavfrätning. Den totala korrosionshastigheten erhöles från plåtarnas respektive stängernas massförlust. Korrosionshastigheten på grund av egenkorrosion erhöles ur sambandet:

Total korr. hast. = Korr. hast. p g a strömbelastning + Korr. hast. p g a egenkorrosion

7 Resultat

7.1 Vattenhaltsprofil

I **figur 11** visas den massbaserade vattenhalten och vattenmättnadsgraden för olika provnivåer i provkärlen. En mera detaljerad redovisning av vattenhalten på olika provnivåer återfinns i **tabell d** i bilagan. Gränsen för vattenmättad jord går mellan *provnivå 4 och 5*, med vattenmättad jord på *nivå 5*. Vattenhalten i kärnen med okopplade plåtar (försök 1) och med kopplade provplåtar (försök 2) stämde mycket bra överens för fyra av fem mätpunkter, med *provnivå 4* som en stor avvikelse: vattenhalten i kärlet med okopplade plåtar var 10 mass-%, medan vattenhalten i kärlet med kopplade plåtar var nästan 19 mass-%.

I kärn 3 med galvanisk korrosion var vattenhalten i regel något högre än i kärn 1 och 2. Vattenhalten, 18 mass-%, på *provnivå 4* i kärn 3 stämde bäst överens med förhållandena i kärlet med kopplade plåtar (kärn 2).

7.2 Strömmätningar

7.2.1 Kopplade provplåtar

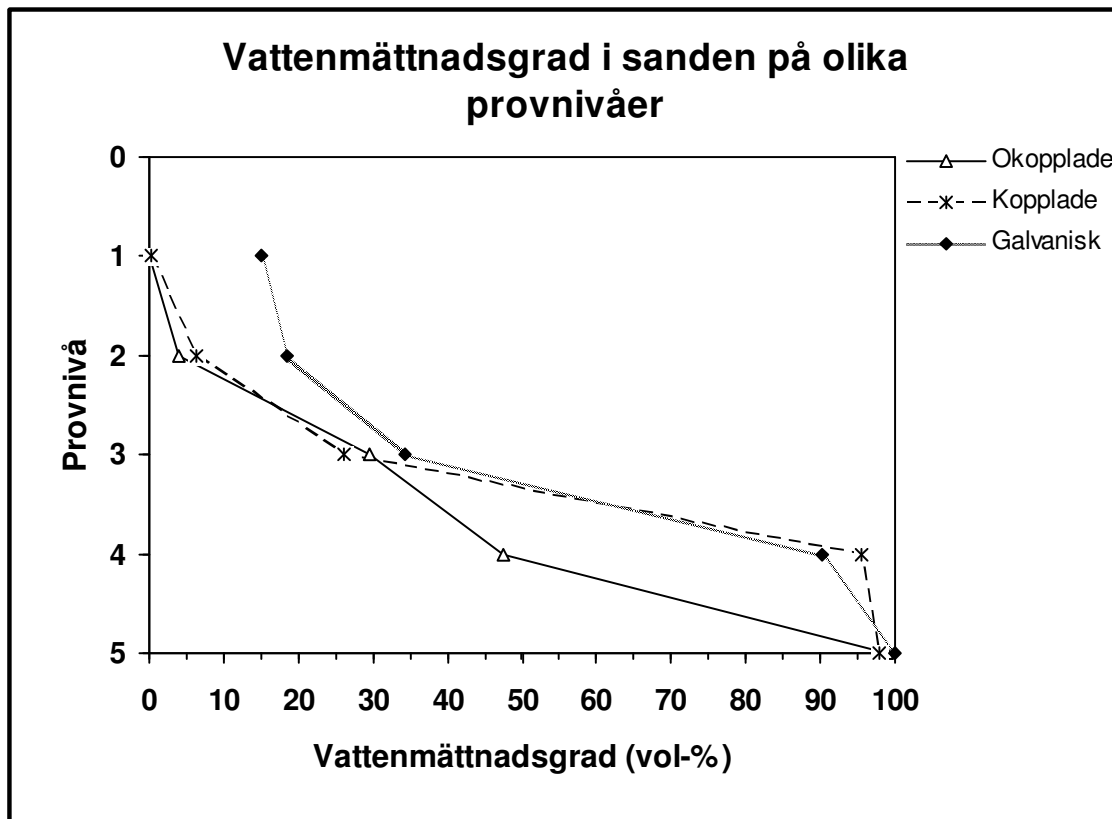
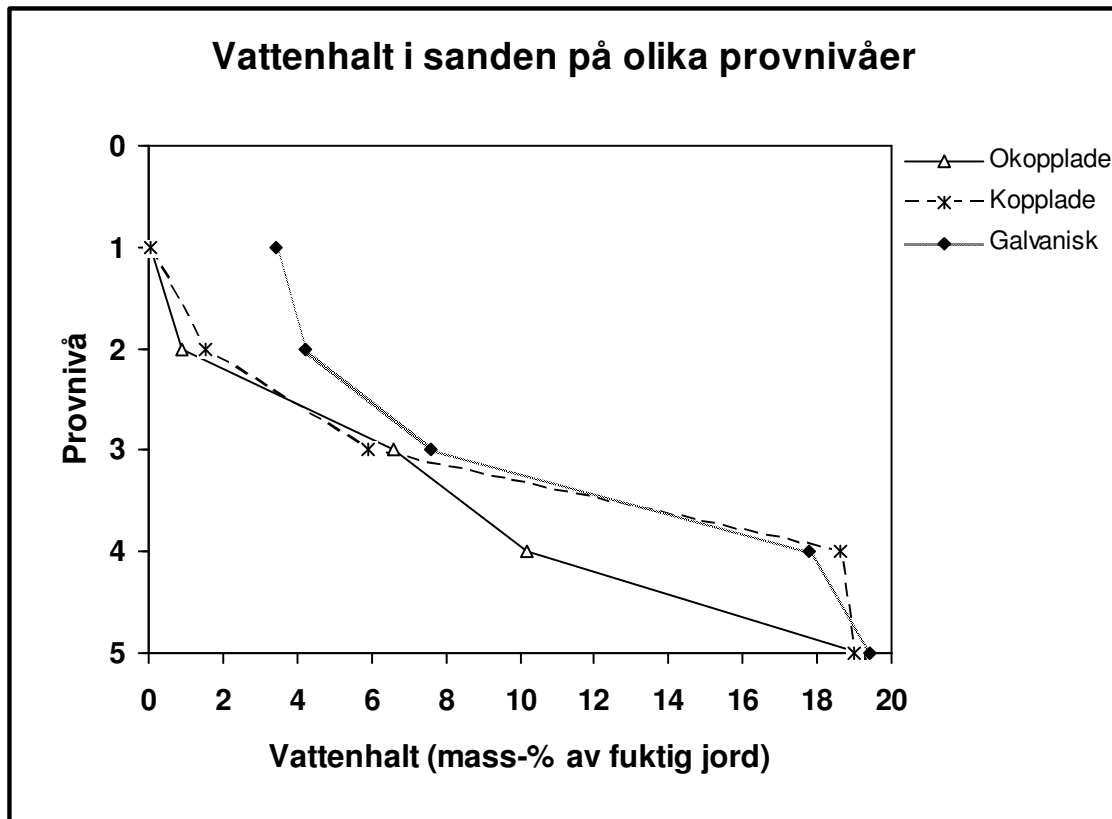
Korrosionsströmmarna för försöket med kopplade plåtar (försök 2) framgår av **figur 12**. Av strömmätningarna framgår att det bildades en galvanisk cell av typen luftningscell vid hopkoppling av provplåtar av stål.

Av **figur 12** framgår att strömmen var anodisk för *nivåerna 4 och 5*, det vill säga plåtarna på dessa nivåer har fungerat som anod i den galvaniska cellen och korroderat på grund av strömbelastningen. Strömmen var särskilt hög på *nivå 4*: 83 μA för serie 1 och 45 μA för serie 2 efter 48 dygns exponering, på *nivå 5* var strömmen 15 μA . För *nivåerna 2 och 3* var strömmen katodisk, det vill säga plåtarna har varit katoder i den galvaniska cellen och erhållit visst katodiskt skydd. Strömmen för provplåtarna på *nivå 1* har varierat omkring noll.

Strömtätheterna framgår av **figur 13**, som visar anodisk strömtäthet, och **figur 14** med katodisk strömtäthet. Den anodiska strömtätheten var efter 48 dygns exponering för *nivå 4*: 32 mA/m^2 för provserie 1 och 17 mA/m^2 för serie 2. För *nivå 5* var strömtätheten 6 mA/m^2 . Av **figur 14** framgår att provplåtar på *nivå 3* erhållit ett visst katodiskt skydd då den katodiska strömtätheten var cirka 30 mA/m^2 . På *nivå 2* har den katodiska skyddsverkan varit ringa på grund av den låga katodiska strömtätheten, 3 mA/m^2 .

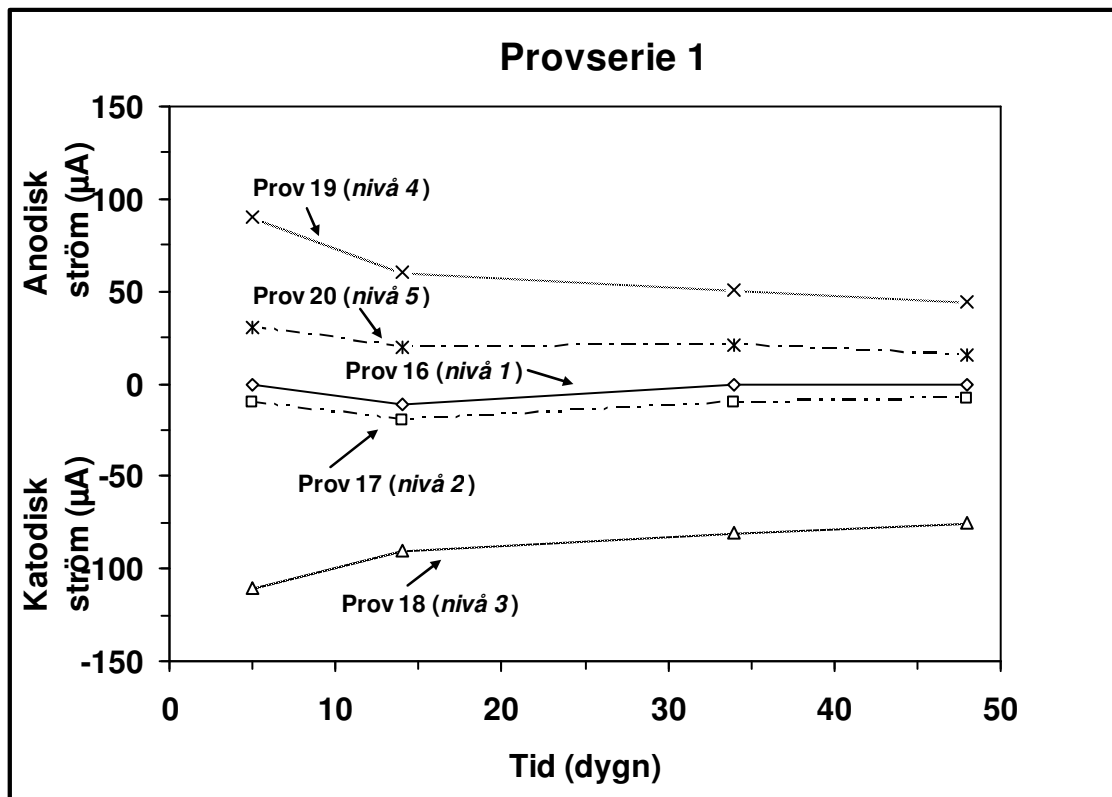
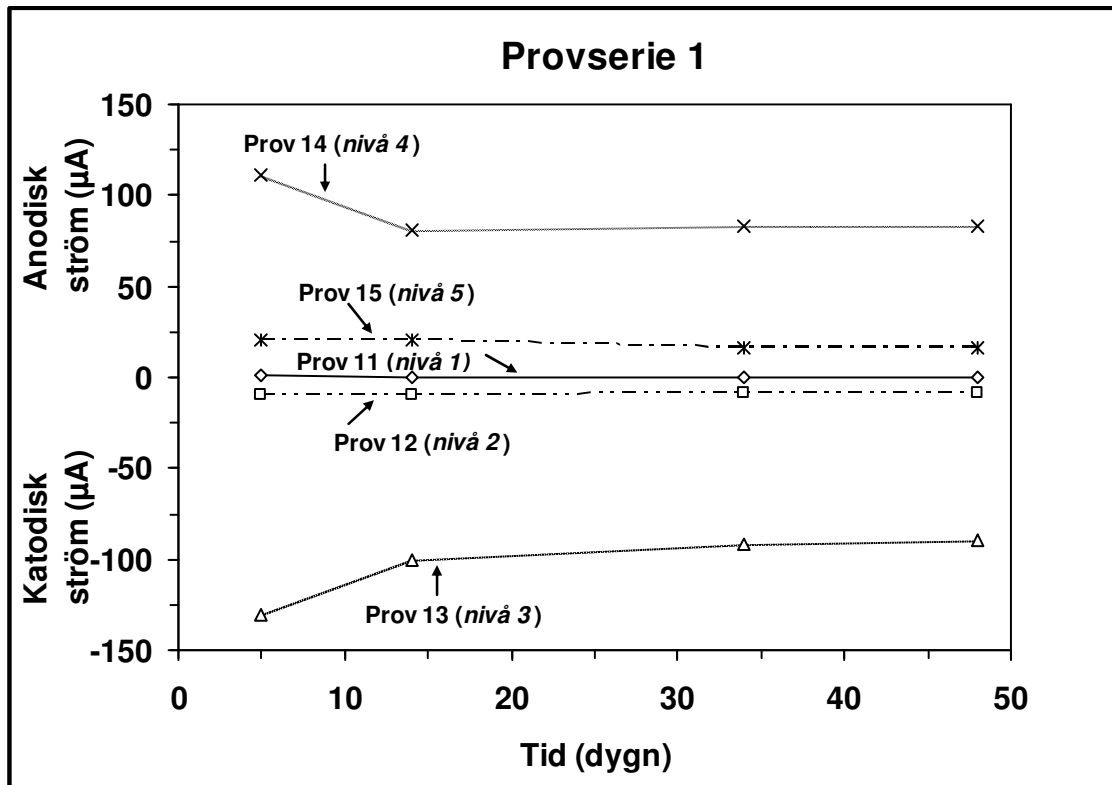
7.2.2 Galvanisk korrosion

I **figur 15** visas den anodiska korrosionsströmmen och korrosionsströmtätheten. Stålstängerna har fungerat som anod i den galvaniska cellen och därmed utsatts för galvanisk korrosion. Strömmarna och strömtätheterna var 310 μA (54 mA/m^2) för serie 1 och 420 μA (73 mA/m^2) för serie 2 efter 48 dygns exponering.



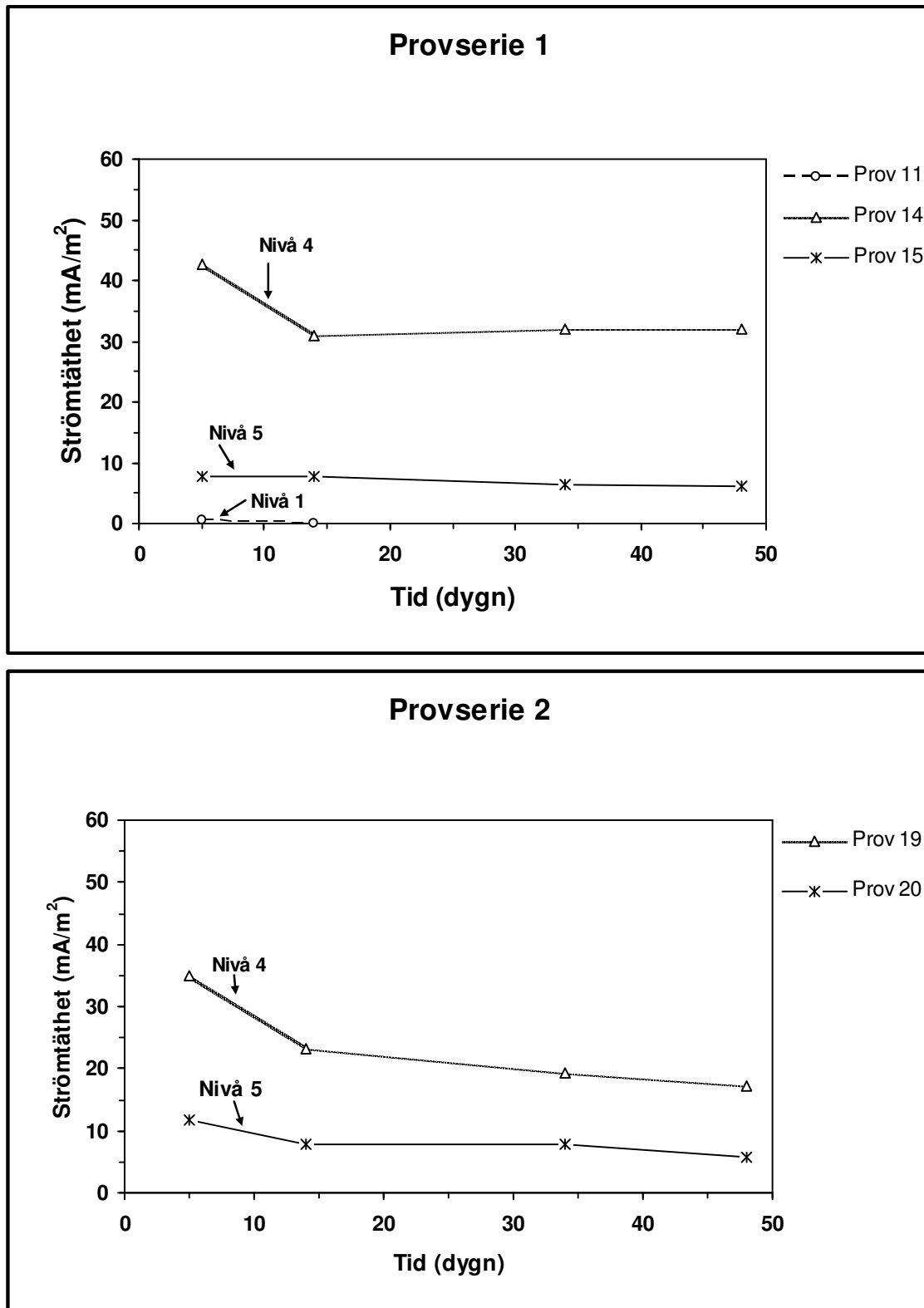
Figur 11. Vattenhalt och vattenmättnadsgrad för varje provnivå.

Ström mellan kopplade plåtar



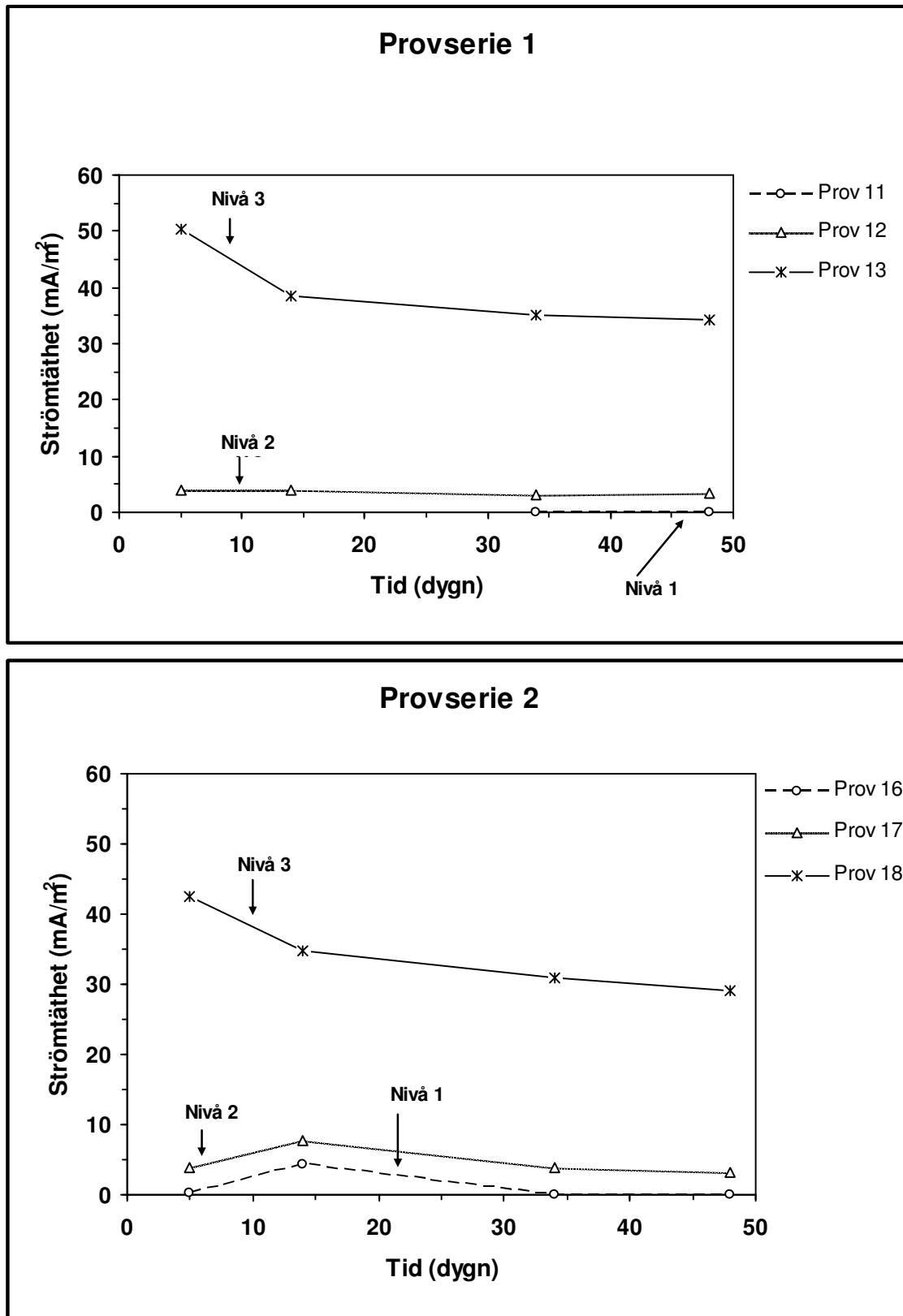
Figur 12. Korrosionsström som funktion av tid för provplåtarna i försök 2.

Anodisk strömtäthet för kopplade plåtar



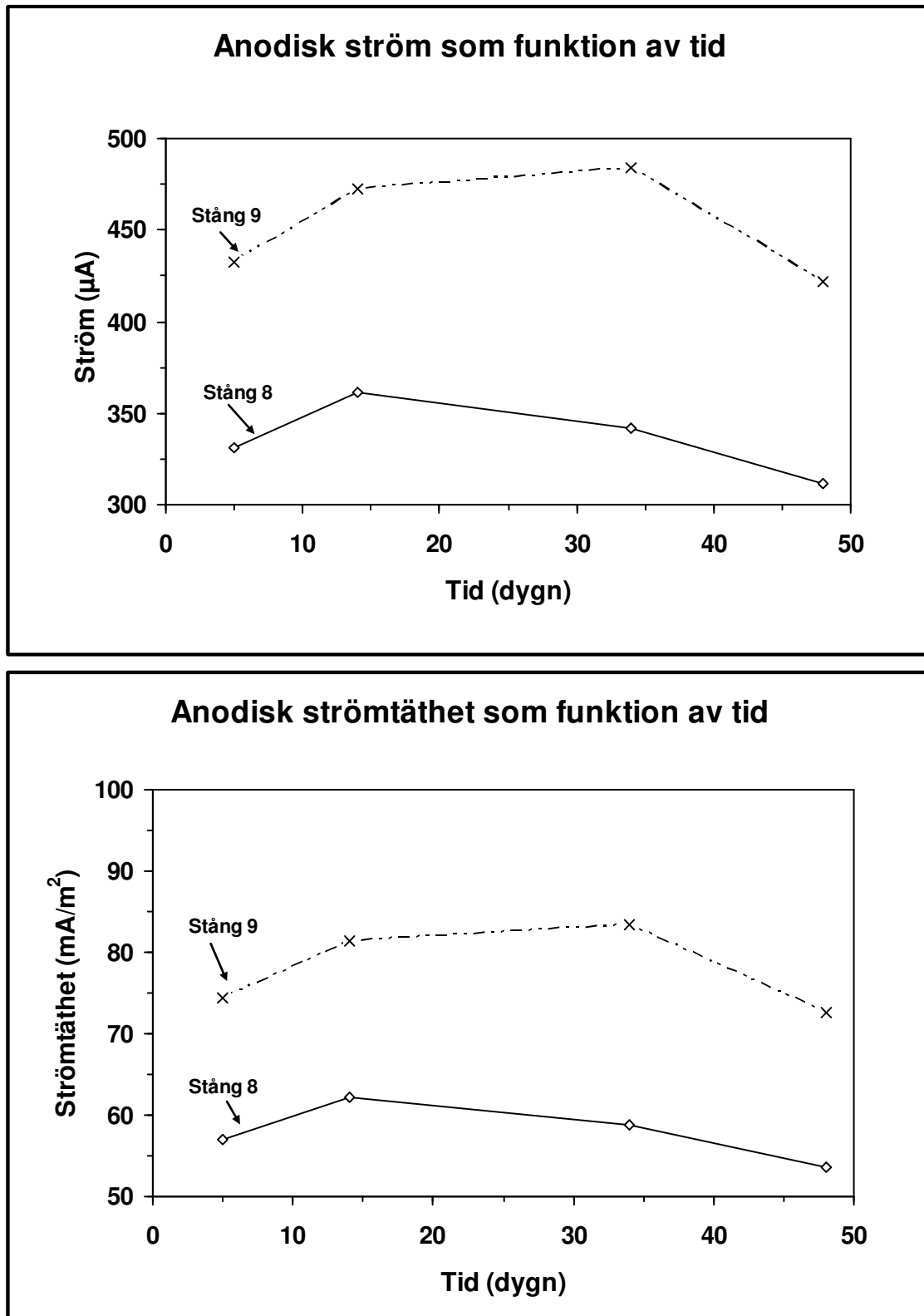
Figur 13. Anodisk strömtäthet som funktion av tid för provplåtarna i försök 2.

Katodisk strömtäthet för kopplade plåtar



Figur 14. Katodisk strömtäthet som funktion av tid för provplåtarna i försök 2.

Galvanisk korrosion på stångar



Figur 15. Anodisk ström och strömtäthet som funktion av tid för stångarna i försök 3.

7.3 Potentialmätningar

7.3.1 Okopplade provplåtar och provstänger

Korrosionspotentialerna för de okopplade plåtarna framgår av **figur 16**.

Efter 48 dygns exponering kan korrosionspotentialerna [mV (SCE)] för de olika provnivåerna ordnas i följande serie med ökande potentialvärden:

$$\underbrace{\text{nivå 4} \approx \text{nivå 5}}_{-740} < \underbrace{\text{nivå 2} \approx \text{nivå 3}}_{-540} < \underbrace{\text{nivå 1}}_{\substack{-350 \text{ för serie 1} \\ -310 \text{ för serie 2}}}$$

Korrosionspotentialerna för de okopplade vertikala stångarna i kärl 1 och 2 visas i **figur 17**. Korrosionspotentialerna var efter 48 dygns exponering i stort sett lika för alla stångarna, cirka -705 mV (SCE).

7.3.2 Kopplade provplåtar

Frånslagspotential för kopplade provplåtar framgår av **figur 18**.

Frånslagspotentialerna [mV (SCE)] efter 48 dygns exponering kan ordnas i följande serie för de olika provnivåerna med ökande potentialvärden:

$$\underbrace{\text{nivå 4}}_{-740} < \underbrace{\text{nivå 5}}_{-720} < \underbrace{\text{nivå 2}}_{\substack{-650 \text{ för serie 1} \\ -630 \text{ för serie 2}}} < \underbrace{\text{nivå 1} \approx \text{nivå 3}}_{\substack{-615 \text{ för serie 1} \\ -595 \text{ för serie 2}}}$$

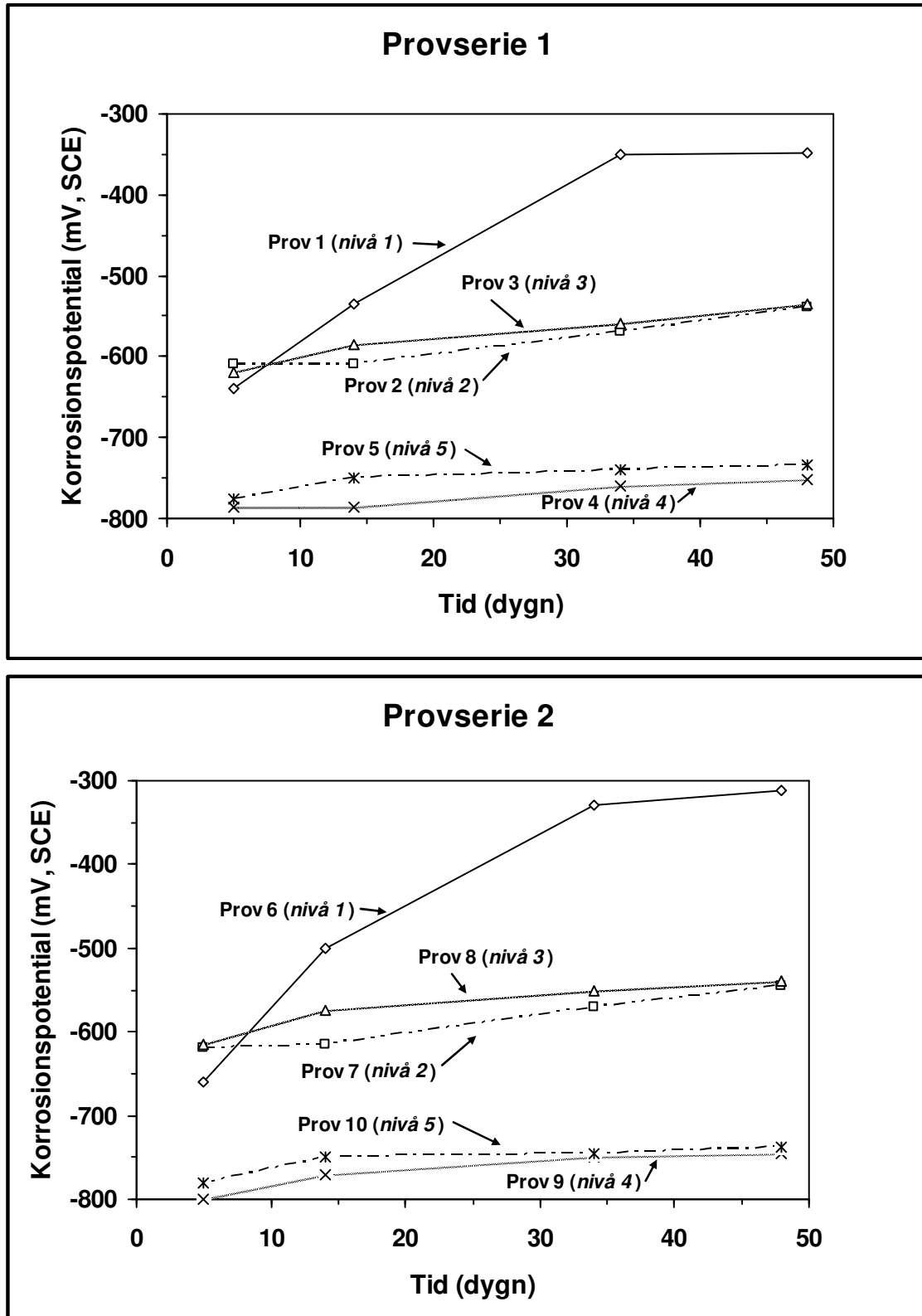
7.3.3 Galvanisk korrosion

Potentialmätningarna vid försöket med sammankoppling av stångar med kopparsångar framgår av **figur 19**. Av figuren med uppmätta elektrodpotentialer framgår att frånslagspotentialen för stålet hade ett mera negativt värde än korrosionspotentialen för stålet. Detta är inte riktigt, eftersom vid galvanisk korrosion kommer elektrodpotentialen för anoden, det vill säga i detta fall för stålet, att förskjutas i positiv riktning från korrosionspotentialen. Frånslagspotentialen för stålet skall alltså ha ett mera positivt värde än korrosionspotentialen och inte tvärtom. Frånslagspotentialmätningarna diskuteras utförligt i **avsnitt 8.2.2**.

Korrosionspotentialen mättes inte för kopparn. Den skall dock vara mera positiv än frånslagspotentialen, eftersom vid galvanisk korrosion kommer elektrodpotentialen för katoden, det vill säga i detta fall för kopparn, att förskjutas i negativ riktning från korrosionspotentialen.

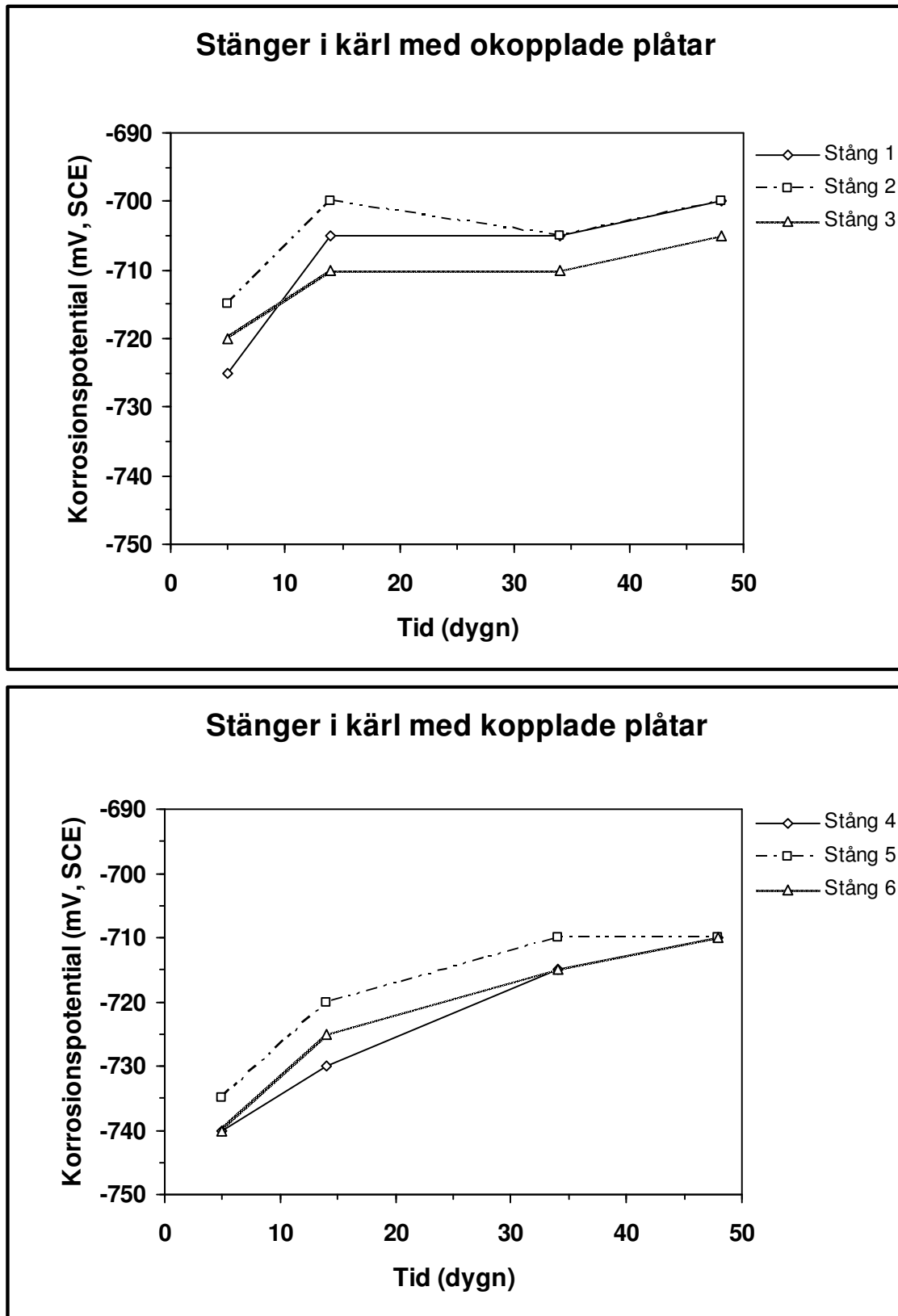
Blandpotentialen för stålet och kopparn var kraftigt förskjuten mot stålets korrosionspotential. Blandpotentialen var storleksordningen 50 mV mera positiv än korrosionspotentialen för stålet.

Korrosionspotential för okopplade plåtar



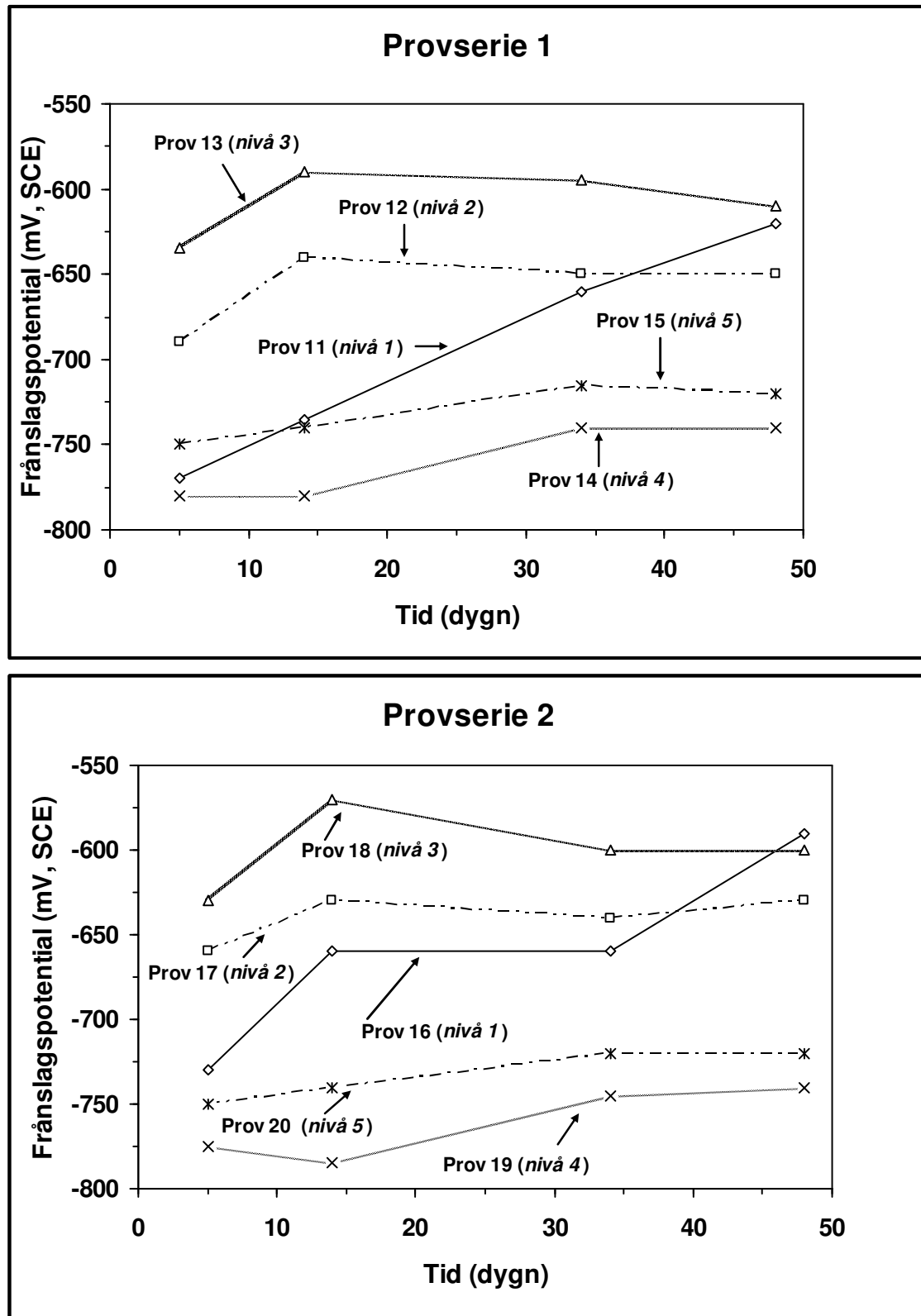
Figur 16. Korrosionspotential som funktion av tid för provplåtarna i försök 1.

Korrosionspotential för fristående stänger



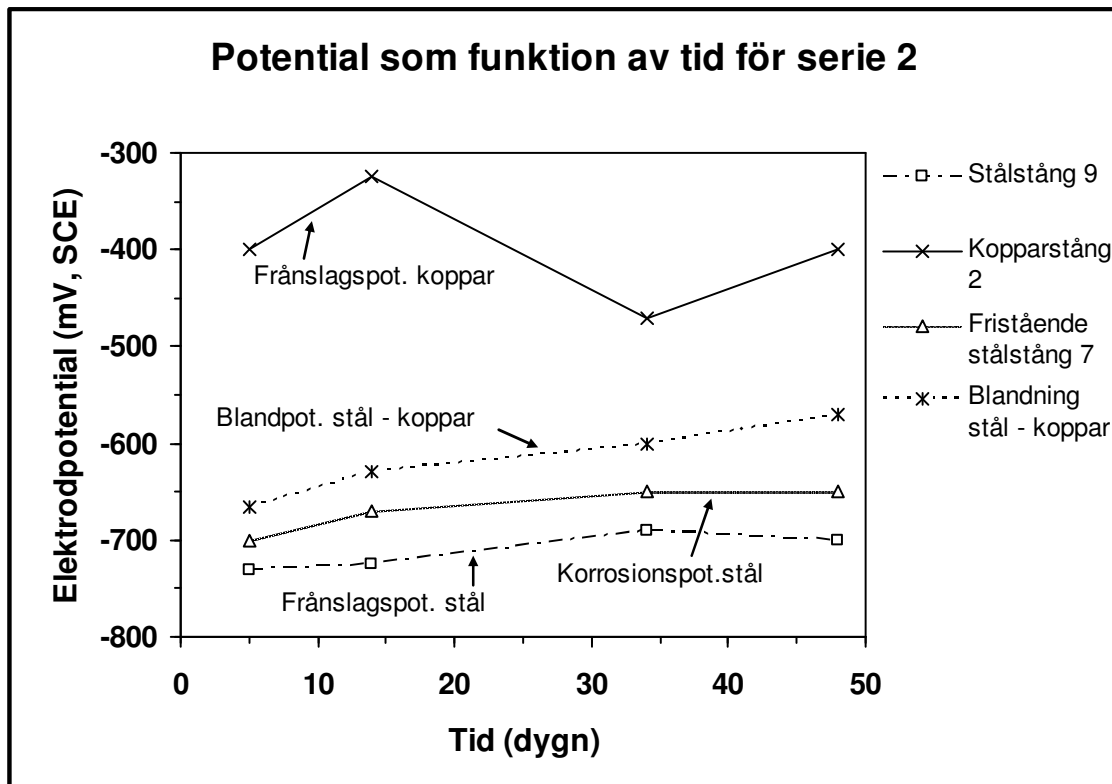
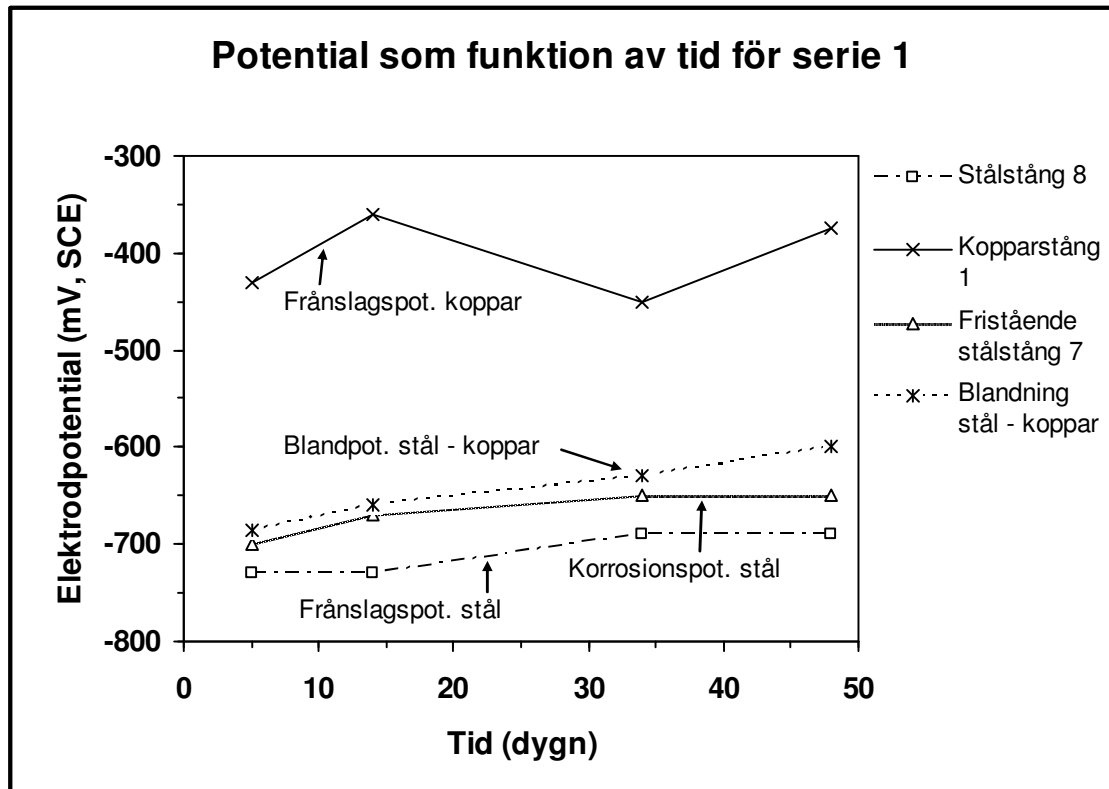
Figur 17. Korrosionspotential som funktion av tid för stängerna i försök 1 och 2.

Frånslagspotential för kopplade plåtar



Figur 18. Frånslagspotential som funktion av tid för provplåtarna i försök 2

Koppling av stålstänger med kopparstänger



Figur 19. Elektrodpotential som funktion av tid för stängerna i försök 3.

7.4 Korrosionshastigheter

7.4.1 Okopplade provplåtar och provstänger

Den jämna och maximala lokala korrosionshastigheten vid olika vattenhalter framgår av **figur 20**. En detaljerad sammanställning över korrosionshastigheter återfinns i **tabell e** i bilagan. I **tabell g** i bilagan finns en sammanställning över uppmätta frätgropsdjup för både okopplade (försök 1) och kopplade provplåtar (försök 2).

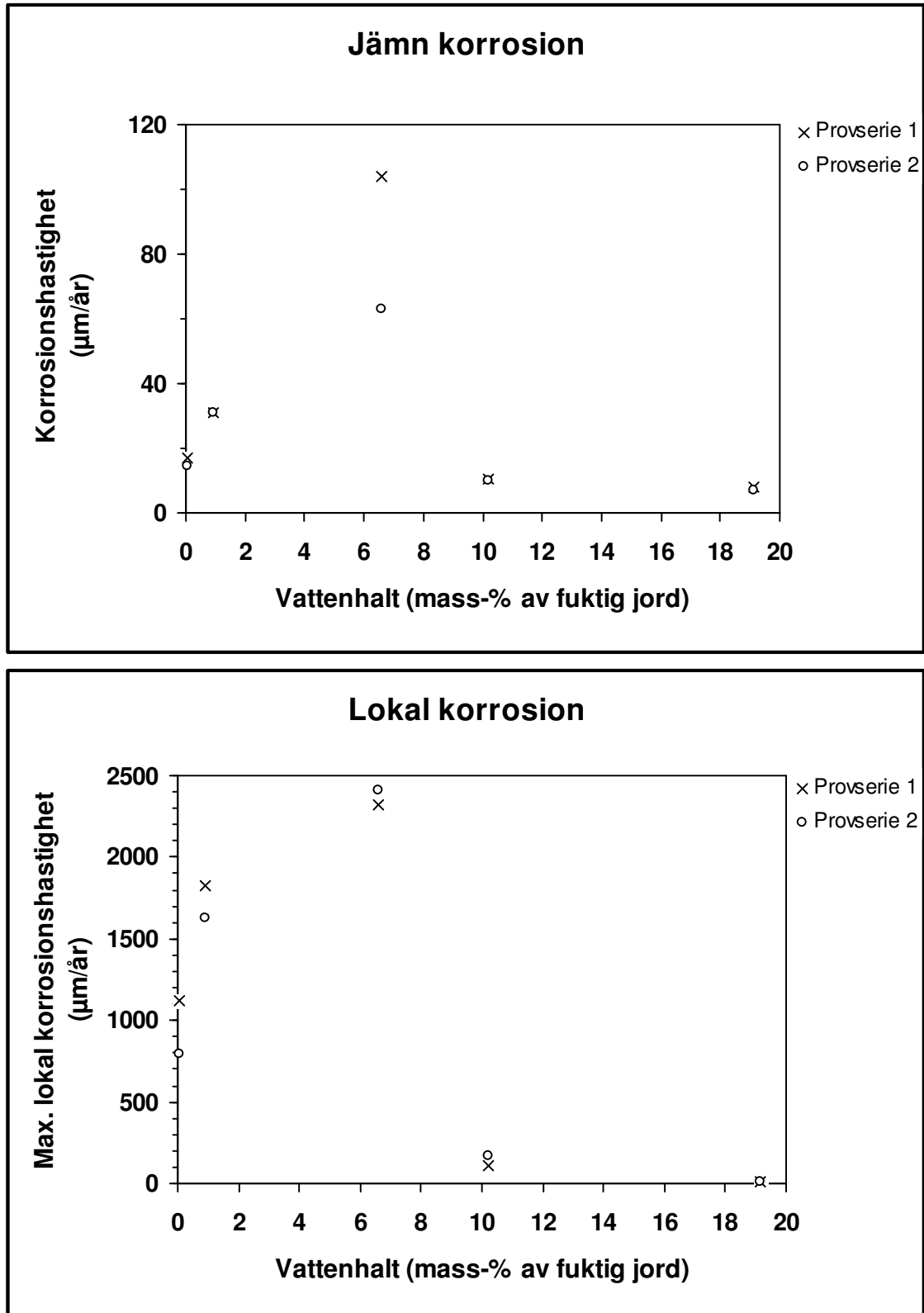
Maximal jämn och lokal korrosionshastighet har erhållits på *nivå 3* med vattenhalten 6,6 mass-%. Vid lägre och högre vattenhalt än denna för korrosionen optimala vattenhalt avtog både den jämna och lokala korrosionshastigheten. Korrosionshastigheten avtog snabbare vid 7 mass-% ökande vattenhalter än vad fallet var vid 7 mass-% minskande vattenhalter. Den lokala korrosionshastigheten var fortfarande hög på *nivå 1* (960 $\mu\text{m}/\text{år}$) med vattenhalten 0,03 mass-% och på *nivå 2* (1730 $\mu\text{m}/\text{år}$) med vattenhalten 0,9 mass-%. I vattenmättad jord på *nivå 5* förekom endast låg jämn korrosion och ingen lokal korrosion.

Korrosionshastigheterna för de okopplade vertikala stångarna vid försök 1 (okopplade plåtar) och försök 2 (kopplade plåtar) framgår av **tabell 3**.

Tabell 3. Korrosionshastighet hos stående och okopplade stångar exponerade i kvartssand under 56 dygn i kärl 1 och 2. Medelvärde och standardavvikelse anges för trippelprov.

Provkärl	Prov nr	Korrosionshastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$)		
		Resultat för varje enskild stång	Medelvärde	Standardavvikelse
Kärl med okopplade plåtar	1	21		
	2	22	21	0,2
	3	21		
Kärl med kopplade plåtar	4	30		
	5	27	28	1,4
	6	27		

Okopplade plåtar



Figur 20. Jämn och lokal korrosionshastighet för olika vattenhalter för försök 1.

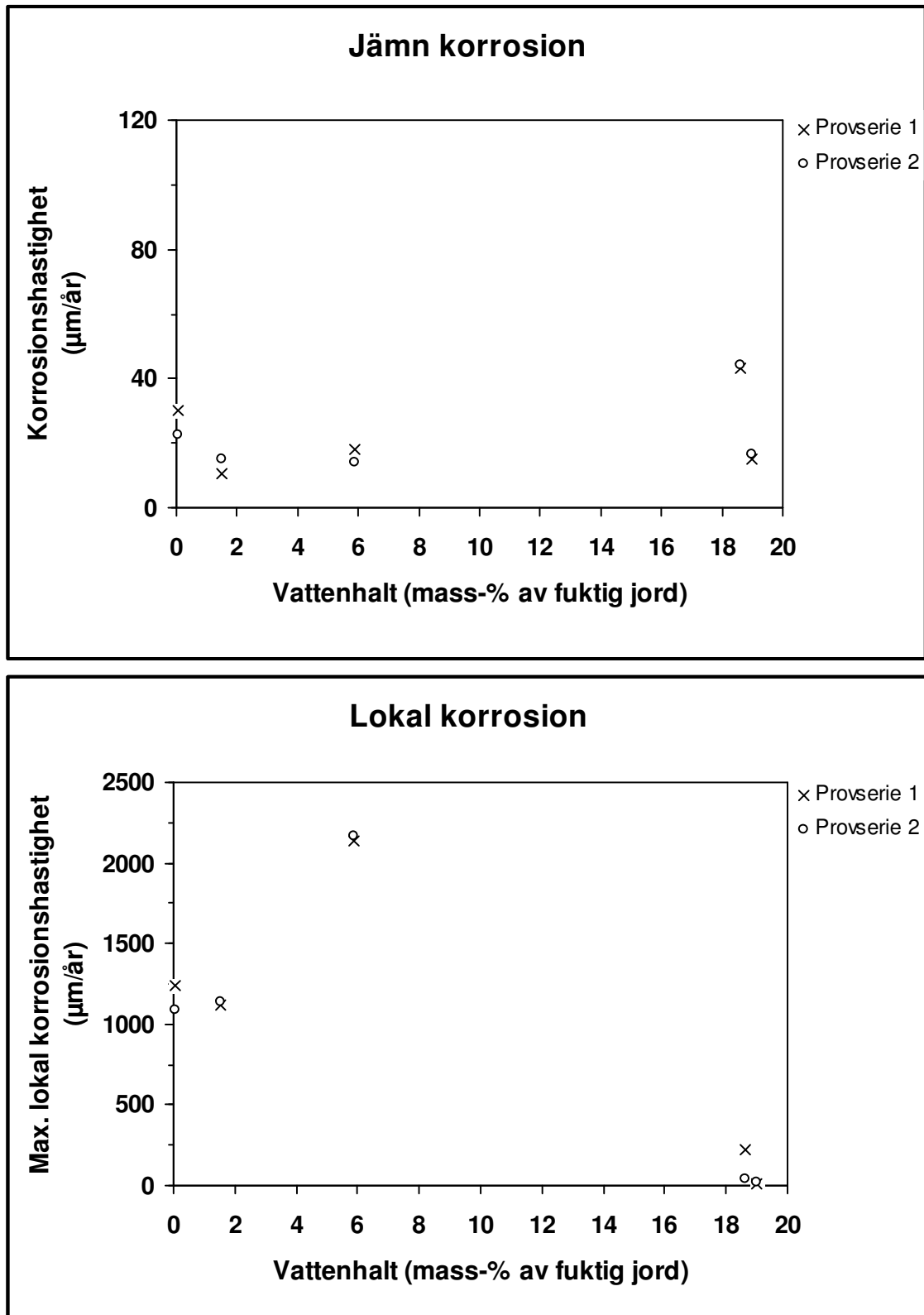
7.4.2 Kopplade provplåtar

Den jämna och maximala lokala korrosionshastigheten vid olika vattenhalter framgår av **figur 21**. En detaljerad sammanställning över korrosionshastigheter återfinns i **tabell f** i bilagan. I **tabell g** i bilagan finns en sammanställning över uppmätta frätgropsdjup för både okopplade (försök 1) och kopplade provplåtar (försök 2).

Maximal jämn korrosionshastighet ($44 \mu\text{m}/\text{år}$) för de kopplade provplåtarna har erhållits på *nivå 4* med vattenhalten nästan 19 mass-%. Den näst högsta korrosionshastigheten ($26 \mu\text{m}/\text{år}$) uppmättes på *nivå 1* med den lägsta vattenhalten. På *nivå 3* med vattenhalten 6 mass-% erhöles maximal lokal korrosionshastighet ($2150 \mu\text{m}/\text{år}$). Den lokala korrosionshastigheten var också hög (cirka $1150 \mu\text{m}/\text{år}$) på *nivå 1* och *2*. I vattenmättad jord på *nivå 5* förekom endast relativt låg jämn korrosion och ingen lokal korrosion.

Av **tabell 4** framgår uppdelning av korrosionshastigheten i korrosionshastighet orsakad av strömbelastningen och i korrosionshastighet orsakad av egenkorrosion. Korrosion orsakad av strömbelastning förekommer på *provnivå 4 och 5*. På dessa nivåer dominerar också korrosionen orsakad av strömbelastning över egenkorrosionen.

Kopplade plåtar



Figur 21. Jämn och lokal korrosionshastighet för olika vattenhalter för försök 2.

Tabell 4. Uppdelning av korrosionshastigheter i korrosion på grund av strömbelastning och egenkorrosion för kopplade provplåtar exponerade i kvartssand med olika vattenhalt under 56 dygn.

Provnivå	Provserie	Prov nr	Korrosionshastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$)			Andel (%)
			Korr. hast. p g a strömbelastning	Korr. hast. p g a egenkorrosion	Total korrosionshastighet	Korrosion p g a strömbelastning
1	1	11	0,1	30	30	0,4
2	1	12	0	11	11	0
3	1	13	0	18	18	0
4	1	14	39	4,4	43	90
5	1	15	8,1	6,9	15	54
1	2	16	0	22	22	0
2	2	17	0	15	15	0
3	2	18	0	14	14	0
4	2	19	26	18	44	59
5	2	20	11	5,4	17	68

7.4.3 Galvanisk korrosion

Korrosionshastigheterna för stålstångerna i försök 3 framgår av **tabell 5**. Av tabellen framgår att korrosionshastigheten ökade från 39 $\mu\text{m}/\text{år}$ i okopplat tillstånd till 151 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid sammankoppling med kopparstång. Korrosionshastigheten var alltså 3,9 gånger större – ökningen var 290 % – vid sammankoppling med koppar. Korrosionen orsakad av egenkorrosion var ungefär lika stor som korrosionen orsakad av strömbelastning. Egenkorrosionen på de hopkopplade stängerna (83 respektive 62 $\mu\text{m}/\text{år}$) var betydligt högre än korrosionen på den fristående stången (39 $\mu\text{m}/\text{år}$). Egenkorrosionen vid galvanisk korrosion var 1,6 respektive 2,1 gånger större än korrosionshastigheten för den okopplade stången.

Tabell 5. Uppdelning av korrosionshastigheter i korrosion på grund av strömbelastning och egenkorrosion för stålstänger kopplade med kopparstänger exponerade i kvartssand med olika vattenhalt under 56 dygn. Korrosionshastigheten anges också för fristående stång.

Typ av stång	Prov nr	Korrosionshastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$)			Andel (%)
		Korr. hast. p g a strömbelastning	Korr. hast. p g a egenkorrosion	Total korrosions- hastighet	Korrosion p g a strömbelastning
Kopplad med kopparstång nr 1	8	67	83	150	45
Kopplad med kopparstång nr 2	9	91	62	153	60
Fristående	7	–	–	39	–

8 Diskussion

8.1 Strömmätning

8.1.1 Kopplade provplåtar

I **figur 22** visas en schematisk bild av strömmarna mellan hopkopplade provplåtar vid försök 2. Av de uppmätta strömmarna i försök 2, se **figur 12** visande strömmar och **figur 13 och 14** med strömtätheter, framgår det att provplåtarna på de tre översta nivåerna (*nivåerna 1, 2 och 3*) fungerat som katoder till plåtarna på de två lägsta nivåerna (*nivåerna 4 och 5*) i luftningscellen.

Plåtarna särskilt på *nivå 1*, men också på *nivå 2*, hade endast i liten omfattning fungerat som katoder. Man kan också se att provplåtarna från *nivå 3* tillsammans med provplåtarna från *nivå 4* bildat i stort sett egna luftningsceller, där plåtarna från *nivå 3* verkat som katoder på bekostnad av plåtarna på *nivå 4*. Vattenhalten har tydligen varit tillräcklig för att ge god elektrisk ledningsförmåga mellan *nivå 3 och 4* samtidigt som syretillförseln till *nivå 3* varit tillfredsställande. Att plåtarna på *nivå 3* gett större tillskott till korrosionen på *nivå 4* än på *nivå 5* (där samma förutsättningar råder) beror troligen på att avståndet till *nivå 5* var större och den elektriska resistansen därmed högre.

I **figur 12** ser man även den samverkan, som rått mellan proverna på *nivå 3 och 4*. När den katodiska strömmen på *nivå 3* avtagit under provningstiden har samtidigt den anodiska strömmen på *nivå 4* avtagit lika mycket.

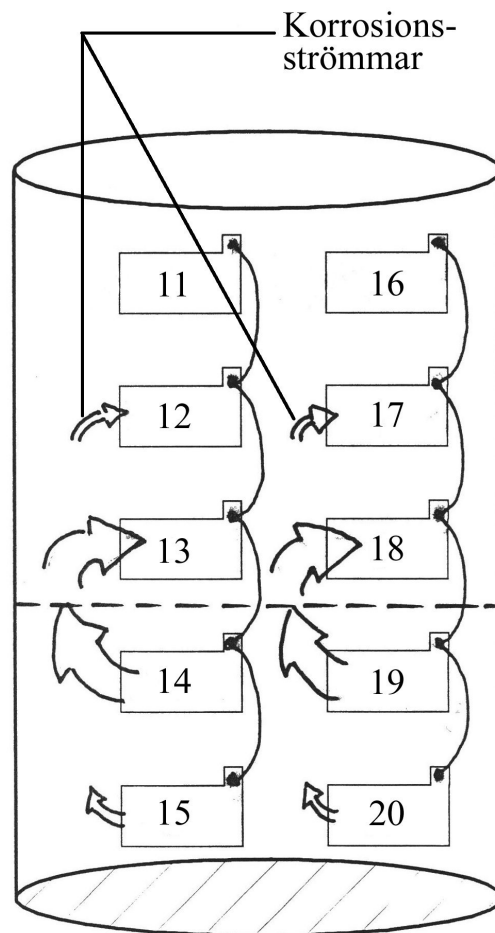
8.1.2 Galvanisk korrosion

Av strömmätningarna, **figur 15**, framgår att stålstången fungerade som anod (oädlare metall) och kopparstången som katod (ädlare metall) i den galvaniska cellen.

Från **tabell 5** framgår att korrosionen på grund av strömbelastning svarade för 45 respektive 60 % av den totala korrosionen. Egenkorrosionen dominerade alltså i det ena fallet över korrosionen på grund av strömbelastning. Här är att märka att egenkorrosionen vid galvanisk korrosion inte är samma sak som "vanlig" korrosion hos ett okopplat föremål, som inte utsätts för galvanisk korrosion. Egenkorrosionshastigheten vid galvanisk korrosion är högre än korrosionshastigheten vid fri korrosion utan hopkoppling till annan metall. Detta på grund av att anoden i den galvaniska cellen aktiveras under strömbelastning.

Vid galvanisk koppling mellan två metaller kommer anodens (i detta fall stålets) elektropotential att förskjutas i positiv riktning från metallens korrosionspotential i okopplat tillstånd till ett mera positivt värde. Detta betyder att egenkorrosionen vid galvanisk korrosion sker vid ett mera positivt värde på elektropotentialen än vid "vanlig" korrosion utan hopkoppling till annan metall. Storleken på förskjutningen av elektropotentialen hos den oädlare metallen vid galvanisk korrosion bestäms i sin tur av till vilken annan metall den är kopplad, areaförhållandet mellan den oädlare metallen (exempelvis kolstål) och den ädlare (exempelvis koppar) samt korrosionsmiljön.

I det här fallet förefaller de uppmätta strömvärdena att vara för låga. Korrosionen på grund av strömbelastning borde dominera över egenkorrosionen.



Figur 22. Schematisk bild av strömmar mellan hopkopplade provplåtar vid försök 2.

8.1.3 Felkällor

I undersökningen mättes strömmen vid fyra tillfällen. Särskilt med tanke på beräkningarna av korrosionshastigheten på grund av strömbelastning hade det varit fördelaktigt med fler mättillfällen. En annan felkälla var den låga upplösningen hos amperemetern vid mätning med inre resistansen $666,7 \Omega$. De uppmätta strömmarna vid försök 3 med galvanisk korrosion förefaller att vara för låga, medan strömmarna vid försök 2 med kopplade provplåtar verkar rimliga.

8.2 Potentialmätning

8.2.1 Korrosionspotential för okopplade plåtar

Korrosionspotentialerna för de okopplade provplåtarna kan rangordnas i följande ordning med mera positiva potentialvärden med avseende på placering i provkärlet:

$$\text{nivå 4} \approx \text{nivå 5} < \text{nivå 2} \approx \text{nivå 3} < \text{nivå 1}$$

Det innebär att det finns ett visst samband mellan vattenhalten i jorden och korrosionspotentialen, det vill säga en tendens att korrosionspotentialen blir mera positiv med minskande vattenhalt. Syretillförseln genom jorden fram till provplåtarna påverkas i sin tur kraftigt av vattenhalten med snabbare syretillförsel vid låg vattenhalt. När syretillförseln till ett fristående stålföremål är hög förskjuts föremålets korrosionspotential i jorden mot positivare värden.

8.2.2 Felkällor vid frånslagspotentialmätningar

Frånslagspotentialmätningarna var behäftade med ett systematiskt fel. Provplåtar i försök 2, med hopkopplade provplåtar, som fungerade som anod i den galvaniska cellen, har fått en allt för negativ frånslagspotential och provplåtar, som fungerade som katod, har erhållit en för positiv frånslagspotential. I försök 3 med galvanisk korrosion har stångarna erhållit en för negativ frånslagspotential, medan kopparstångarna fått en för positiv frånslagspotential.

Av **figur 19** med uppmätta elektropotentialer för försök 3 med galvanisk korrosion framgår att frånslagspotentialen för stålet hade ett mera negativt värde än korrosionspotentialen för stålet. Detta är felaktigt, eftersom vid galvanisk korrosion kommer elektropotentialen för anoden, det vill säga i detta fall för stålet, att förskjutas i positiv riktning från korrosionspotentialen. Frånslagspotentialen för stålet skall alltså ha ett mera positivt värde än korrosionspotentialen och inte tvärtom.

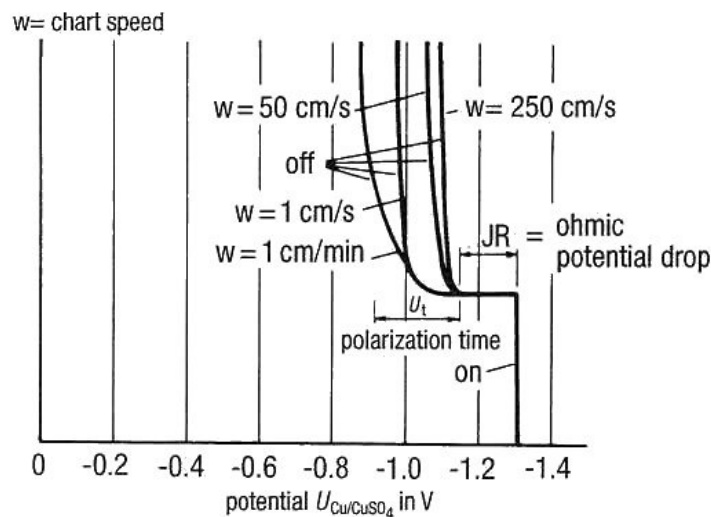
Frånslagspotential avser elektropotential utan spänningsfall (IR-fall) i elektrolyten mellan referenselektroden och provplåten/provstången och avser elektropotential med frånslagen ström. IR-fallet kan mätas genom snabb brytning av strömmen och registrering av elektropotentialens brytningsförlopp, så kallat transient förlopp med oscilloskop eller ännu hellre med digitalt minnesoscilloskop eller så kallad transient recorder. IR-fallet är det momentana potentialsprånget i brytningsögonblicket. För exakt bestämning av IR-fallet krävs en brytare, som bryter strömmen exakt och omedelbart, utan fördröjning samt mycket snabb upptagning av brytningsförloppet. Vid allt för långsam registrering av brytningsförloppet hos elektropotentialen blir upptagningen av det transienta förloppet svårtolkat och IR-fallets storlek överdrivs.

Det hade varit bättre om referenselektroder varit nedgrävd i sanden i närheten av provplåtarna i provcylindrarna, på samma sätt som i tidigare undersökningar [7], istället för att som nu placerades i provlösningen i det yttre kärlet vid mätning av frånslagspotential. Om referenselektroden varit nedgrävd i sanden hade avståndet mellan referenselektroden och provplåtarna blivit mindre och IR-fallet hade också blivit mindre.

Vid katodiskt skydd av olika metallkonstruktioner i jord och vatten används begreppet skyddspotential, det vill säga den elektropotential vid vilken fullständigt katodiskt skydd erhålles och korrosionen på konstruktionen är praktiskt försumbar. För kolstål i jord och vatten är skyddspotentialen lika med eller mer negativ än -850 mV relativt mättad koppar/kopparulfatelektrod (Cu/CuSO_4). Vid användning av en mättad kalomelektrod (SCE) blir skyddspotentialen lika med eller mer negativ än -775 mV.

Vid mätning av skyddspotentialen skall man ta hänsyn till IR-fallet. Man talar därför om så kallad IR-fri skyddspotential, det vill säga skyddspotential utan IR-fall mellan referenselektrod och skyddsföremål. Här angivna skyddskriterier avser IR-fri skyddspotential. Potentialmätningar vid katodiskt skydd behandlas utförligt i handböcker av von Baekmann med flera [24, 25, 26, 27] och i en handbok av Lazzari & Pedferri [28].

I **figur 23** visas hur brytningsförloppet varierar med registreringshastigheten. Vid långsam registreringshastighet överdrivs IR-fallets storlek och den uppmätta skyddspotentialen blir mera positiv än verklig IR-fri skyddspotential.



Figur 23. Registrering av brytningsförloppet med olika registreringshastighet av skyddspotentialen för kolstål vid brytning av strömmen. Försöket avsåg katodiskt skydd av kolstål i syntetisk jordvattenlösning och försöket hade pågått 200 timmar vid brytning av strömmen. Skyddspotentialen mättes relativt mättad koppar/kopparulfatelektrod. Figur från von Baekmann, Schwenk & Prinz [24].

IR-fri potential beräknas enligt:

$$E_{\text{IR-fri}} = E_{\text{till}} - U_{\text{IR}}$$

där

$E_{\text{IR-fri}}$ = IR-fri potential, V

E_{till} = tillslagspotential, det vill säga potential med påslagen ström, V

U_{IR} = IR-fall mellan referenselektrod och mät föremål, V

I ovanstående ekvation måste IR-fallet anges med rätt tecken. Vid mätning av elektrodpotential för katoden anges IR-fallet med minustecken och vid mätning av elektrodpotential för anoden anges IR-fallet med plustecken.

I **figur 23** är tillslagspotentialen $E_{\text{till}} = -1310$ mV (Cu/CuSO₄) och IR-fallet $U_{\text{IR}} = -160$ mV. Den IR-fria skyddspotentialen blir således relativt mättad koppar/kopparsulfatelektrod:

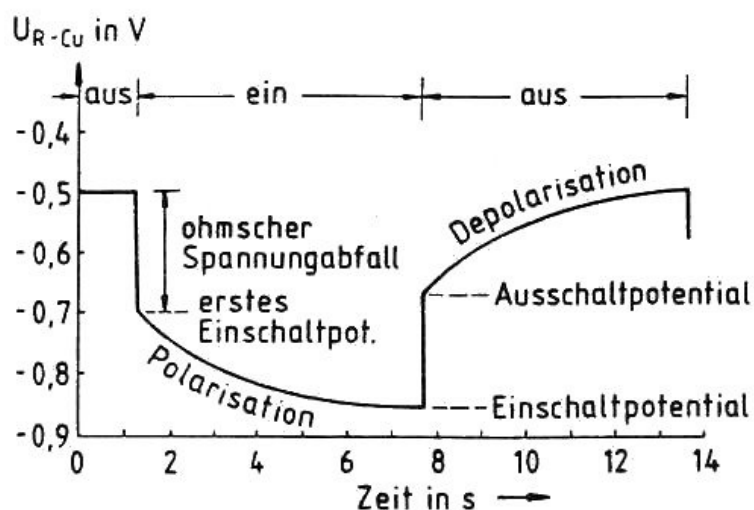
$$E_{\text{IR-fri}} = -1310 - (-160) = -1150 \text{ mV}$$

Vid mätning av skyddspotential brukar också begreppet frånslagspotential, $E_{\text{från}}$, användas. Frånslagspotentialen avser elektrodpotential med frånslagen skyddsström. Det är här viktigt att hålla isär begreppen. Korrekt använt avser frånslagspotentialen elektrodpotentialen momentant efter brytning av skyddsströmmen, det vill säga $E_{\text{från}} \approx E_{\text{IR-fri}}$. Frånslagspotentialen får inte sammanblandas med mätning av potentialavklingning (potentialförskjutning i positiv riktning) hos skyddsföremålet, det vill säga att elektrodpotentialen hos skyddsföremålet blir mer positiv efter en viss tid (till exempel 1 timme eller 24 timmar) efter brytning av skyddsströmmen. Ibland används de engelska termerna "on potential" och "off potential" också på svenska för tillslags- respektive frånslagspotential.

Vid långsam upptagning av brytningsförloppet erhålles ett för stort IR-fall eftersom också delar av den elektrokemiska polarisationen, främst koncentrationspolarisation, mäts in i potentialvärdet. **Figur 24** visar potentialregistrering vid till- och frånslag av skyddsströmmen vid katodiskt skydd. Långsam upptagning av brytningsförloppet medför att en del av avpolariseringen (depolarisation) mäts in i frånslagspotentialvärdet.

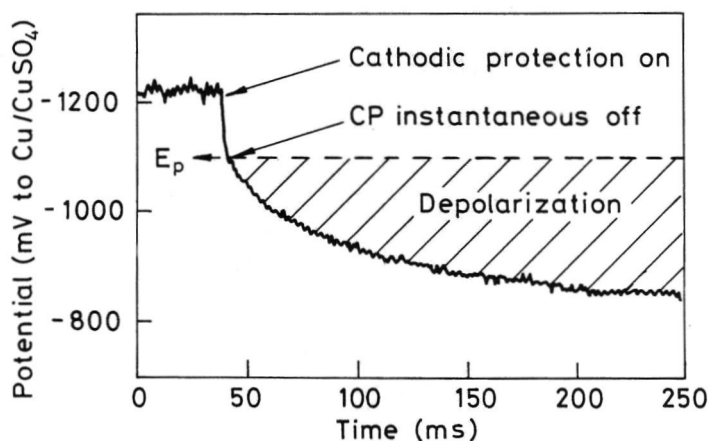
Från **figur 24** kan utläsas att tillslagspotential var -850 mV (Cu/CuSO₄) och IR-fallet 200 mV (egentligen -200 mV). Den IR-fria potentialen (frånslagspotentialen) blir då -650 mV (Cu/CuSO₄), det vill säga fullständigt katodiskt skydd har inte erhållits.

Här ser man också vikten av att korrigera uppmätt skyddspotential för IR-fallet. Man kan förledas tro att fullständigt katodiskt skydd erhållits med ledning av tillslagspotentialen, då potentialvärdet -850 mV (Cu/CuSO₄) erhållits. Den verkliga skyddspotentialen (IR-fri skyddspotential) blev i själva verket 200 mV mer positiv (-650 mV) och något fullständigt katodiskt skydd av konstruktionen har inte uppnåtts.



Figur 24. Registrering av brytningsförloppet vid till- och frånslag av skyddsströmmen vid katodiskt skydd av kolstål. Skyddspotentialen mättes relativt mättad koppar/kopparsulfatelektrod. Ordförklaring: Einschaltpotential = tillslagspotential, Ausschaltpotential = frånslagspotential, erstes Einschaltpotential = första värdet på tillslagspotentialen, ohmscher Spannungsabfall = ohmskt spänningsfall (IR-fall), Depolarisation = avpolarisering. Figur från von Baeckmann & Fleig [26].

Ett annat exempel på potential-tid-kurva vid brytning av strömmen till katodiskt skydd visas i **figur 25**. IR-fallet är det momentana potentialsprånget i brytningsögonblicket.



Figur 25. Potential-tid-kurva vid brytning av skyddsströmmen till katodiskt skydd av jordförlagd rörledning. Figur från Martin [29].

Tillslagspotentialen, E_{till} , för katodiska skyddet på den jordförlagda rörledningen i **figur 25** är något mera negativ än -1200 mV relativt mättad koppar/kopparsulfatelektrod (Cu/CuSO_4). och den verkliga skyddspotentialen, frånslagspotentialen ($E_{\text{från}}$), ligger på cirka -1100 mV (Cu/CuSO_4). Spänningsfallet mellan det katodiskt skyddade röret och referenselektroden, U_{IR} , blir alltså -100 mV.

Vid praktisk mätning av skyddspotential vid katodiskt skydd används ofta en x-t skrivare alternativt en analog eller digital multimeter. Vid användning av en multimeter som mätinstrument tar man det första spänningsvärde, som man hinner uppfatta när strömmen bryts. I dagligt tal brukar man ibland kalla den uppmätta potentialen för "ryckpotential", eftersom man vid mätning rycker loss kabeln till strömförbindelsen.

Vid praktisk mätning av skyddspotential, som till exempel "ryckpotential", kommer storleken på IR-fallet att överdrivas. Den uppmätta frånslagspotentialen blir alltså mer positiv än verklig IR-fri skyddspotential. I och med att uppmätt frånslagspotential är mera positiv, med andra ord är den "sämre", än verklig IR-fri skyddspotential är man, så att säga, på den säkra sidan. Man har gjort en konservativ skattning av den IR-fria skyddspotentialen. Detta är bakgrunden till varför det vid praktisk tillämpning går att mäta skyddspotential som "ryckpotential".

Vid mätning av frånslagspotentialerna vid försök 2 och 3 användes en digital multimeter och som potentialvärde togs det första spänningsvärde, som uppfattades när strömförbindelsen mellan provplåtar alternativt provstänger bröts. Mätningarna utfördes som "ryckpotentialmätningar".

Som tidigare konstaterats har provplåtarna i försök 2, som fungerade som anod i den galvaniska cellen, fått en allt för negativ frånslagspotential och provplåtarna, som fungerade som katod, har erhållit en för positiv frånslagspotential. Det är framförallt provplåtarna på *nivå 4* och i mindre omfattning också provplåtarna på *nivå 5*, som fått för negativa potentialvärden. Provplåtar som fungerade som katod i den galvaniska cellen fanns i första hand på *nivå 3*, men provplåtarna på *nivå 2* var också till viss del katoder. För dessa provplåtar var frånslagspotentialerna allt för positiva.

I försök 3 med galvanisk korrosion har alltså stålstängerna erhållit en för negativ frånslagspotential, medan för kopparstängerna har en för positiv frånslagspotential mätts.

En slutsats från undersökningarna är att vid noggranna frånslagspotentialmätningar är det inte tillräckligt att mäta potentialen som "ryckpotential". En snabb registrering av brytningsförloppet krävs för att få en riktig bestämning av IR-fallets storlek.

8.2.3 Frånslagspotential för kopplade provplåtar

Frånslagspotentialerna för de kopplade provplåtarna i undersökningen kunde först rangordnas i följande ordning med mera positiva potentialvärden med avseende på placering i provkärlet:

$$\text{nivå 4} < \text{nivå 5} < \text{nivå 2} < \text{nivå 1} \approx \text{nivå 3}$$

Det var i första hand för provplåtarna på *nivåerna 3 och 4*, som potentialerna var behäftade med fel: för *nivå 3* för positiva uppmätta potentialer och för negativa potentialer för *nivå 4*.

Följande rangordning för frånslagspotentialerna med avseende på placering i provkärlet verkar vara rimlig efter korrigering för mätfel:

nivå 5 < nivå 4 < nivå 2 < nivå 3 < nivå 1

8.3 Korrosionshastigheter

8.3.1 Okopplade provplåtar

Provplåtarna på *nivå 3* med vattenhalten cirka 7 mass-%, hade korroderat med hög jämn korrosionshastighet samt mycket kraftig gropfrätning och mycket hög lokal korrosionshastighet. Provplåtar som placerats över denna nivå hade korroderat med måttlig korrosionshastighet men med påtaglig gropfrätning, dock ej lika påtaglig, som vid vattenhalten 7 mass-%. Provplåtarna under *nivå 3*, i det vattenmättade området, har korroderat med låga jämna korrosionshastigheter nästan helt utan gropfrätning. Det verkar som ett maximum i såväl jämn som lokal korrosionshastighet inträder kring vattenhalten 7 mass-%, som motsvaras av vattenkvoten 7,5 mass-%, volymbaserad vattenhalt 12 vol-% och vattenmättnadsgraden 31 vol-%.

Korrosionens beroende av vattenhalten kan sammanfattas enligt följande:

Hög vattenhalt	* Låg jämn korrosion * Låg lokal korrosionshastighet
Vattenhalt cirka 7 mass-%	* Mycket hög jämn korrosion * Mycket kraftig gropfrätning
Låg vattenhalt	* Måttlig jämn korrosion
Vattenhalt < 7 mass-%	* Påtaglig gropfrätning

De erhållna resultaten överensstämmer med den tidigare laboratorieundersökningen på Korrosionsinstitutet av Sederholm, Svensson & Vinka [7].

8.3.2 Kopplade provplåtar

Provplåtarna på *nivå 4* med vattenhalten cirka 19 mass-% hade korroderat med ganska hög jämn korrosionshastighet, men med mycket låg lokal korrosionshastighet. Provplåtarna över denna nivå hade korroderat med måttlig jämn korrosionshastighet där den översta nivån något överraskande fått en högre hastighet än de båda övriga. Den lokala korrosionshastigheten var klart högst på *nivå 3* med vattenhalten 7 mass-%, men var även hög på de två översta nivåerna. På den lägsta nivån var den jämna avfrätningen måttlig, medan den lokala korrosionen var i det närmaste obefintlig.

Det var mindre väntat att den näst högsta korrosionshastigheten uppstått på nivå 1 där sanden varit torrast. Syretillförseln har dock varit högst på denna nivå samtidigt som den elektriska ledningsförmågan i sanden varit så låg att plåtarna inte kunnat avge mycket ström till övriga nivåer.

Att provplåtarna på *nivå 3* och *nivå 4* i stort sett bildat en egen luftningscell berodde på stor skillnad i vattenhalt mellan nivåerna (*nivå 3*: 6 mass-% och *nivå 4*: 19 mass-%) och kort avstånd mellan provplåtarna. Skillnaden i vattenhalt mellan *nivå 4* och *nivå 5* var mycket liten, cirka 0,5 mass-%. Om skillnaden i vattenhalt varit större mellan *nivå 4* och *nivå 5* är det troligt att korrosionshastigheterna omfördelats något mellan nivåerna: minskad korrosionshastighet på *nivå 4* och ökad korrosionshastighet på *nivå 5*.

Om betingelserna varit som vid försök 1 med okopplade provplåtar med vattenhalterna: *nivå 3*: 7 mass-%, *nivå 4*: 10 mass-% och *nivå 5*: 19 mass-%, är det troligt att provplåtarna på *nivåerna 3 och 4* verkat som katoder och att korrosionshastigheten därigenom ökat något på *nivå 3* och minskat på *nivå 4*. Den högsta korrosionshastigheten hade antagligen uppstått på provplåten på *nivå 5*, som verkat som huvudsaklig anod i luftningscellen.

Generellt kan sägas att det sker en utjämning mellan korrosionshastigheterna på provplåtarna vid hopkoppling. Det fanns ingen provplåt med mycket hög jämn korrosionshastighet som vid vattenhalten 7 mass-% vid försök 1 med okopplade provplåtar. Det fanns heller ingen provplåt med låg jämn korrosionshastighet som i vattenmättad jord (*nivå 5*) vid försök 1 med okopplade provplåtar.

8.4 Jämförelse mellan korrosionshastigheter för okopplade och kopplade provplåtar på olika provnivåer

I **figur 26** jämförs korrosionshastigheterna för kopplade respektive okopplade provplåtar för de olika provnivåerna och i **figur 27** visas procentuell förändring i korrosionshastighet vid hopkoppling med korrosionshastigheten i okopplat tillstånd som utgångspunkt.

8.4.1 Nivå 1

På den översta nivå har strömmen och därmed också strömtätheten varierat omkring noll för de hopkopplade provplåtarna. Det betyder att de hopkopplade provplåtarna på *nivå 1* i huvudsak har korroderat oberoende av de andra provplåtarna på de olika provnivåerna.

Den jämna korrosionshastigheten ökade dock med 68 % från 16 till 26 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling. Den lokala korrosionshastigheten ökade med 21 % från 960 till 1165 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling. Eftersom de hopkopplade provplåtarna inte i någon större utsträckning fungerat som varken anod eller katod i den galvaniska cellen, borde korrosionshastigheten för de hopkopplade provplåtarna vara ungefär lika stor som för de icke sammankopplade provplåtarna. Skillnaderna i korrosionshastighet mellan hopkopplade och inte hopkopplade provplåtar kan kanske ses som slumpmässiga variationer.

8.4.2 Nivå 2

De hopkopplade provplåtarna på nivå 2 har varit katoder i den galvaniska cellen och har erhållit ett visst katodiskt skydd vilket framgår av **figur 14**. Det betyder att korrosionshastigheten minskar i förhållande till okopplade provplåtar. Den katodiska strömtätheten varierade mellan 3 – 4 mA/m².

Skyddsströmtätheten för att erhålla fullständigt katodiskt skydd kan på teoretisk väg uppskattas från korrosionshastigheten hos skyddsföremålet i fritt, icke hopkopplat tillstånd. För syrgasförbrukande korrosion är skyddsströmtätheten lika stor som korrosionsströmtätheten [30]. Korrosionsströmtätheten kan med hjälp av Faradays lag beräknas från korrosionshastigheten. Korrosionshastigheten 1 µm/år för järn motsvaras av korrosionsströmtätheten 0,86 mA/m² och därmed också av skyddsströmtätheten 0,86 mA/m².

Korrosionshastigheten för icke hopkopplade provplåtar var 31 µm/år. För att erhålla ett fullständigt katodiskt skydd krävs alltså skyddsströmtätheten 27 mA/m². I detta har endast ett ofullständigt skydd uppnåtts där den uppmätta skyddsströmtätheten var 13 % av den erforderliga skyddsströmtätheten.

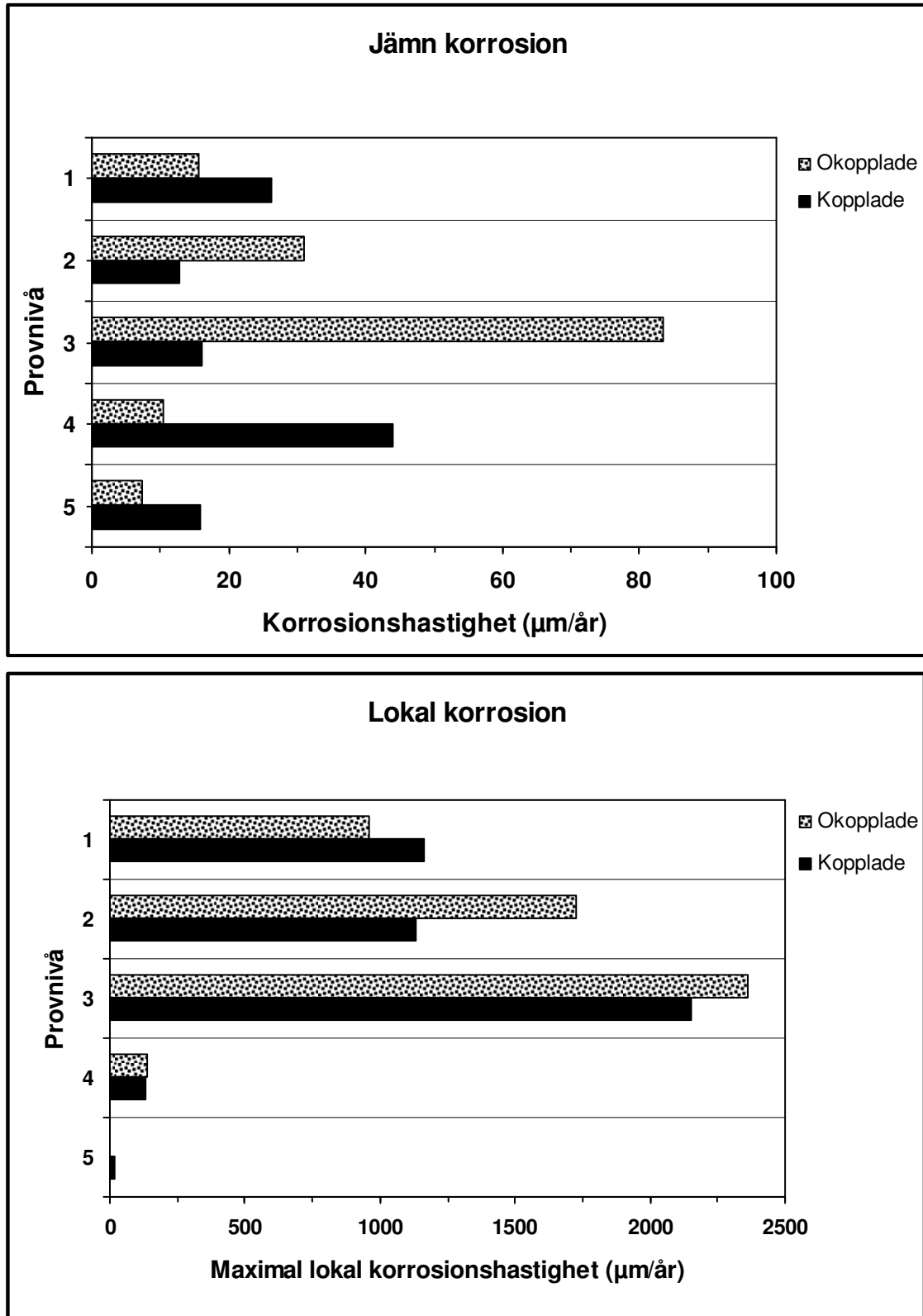
Den jämna korrosionshastigheten minskade med 59 % från 31 till 13 µm/år vid hopkoppling. Skyddsgraden för det katodiska skyddet, som definieras som minskningen i korrosionshastighet vid hopkoppling av provplåtar, blev följaktligen också 59 %. Den lokala korrosionshastigheten minskade något mindre (34 %) än den jämna korrosionshastigheten.

8.4.3 Nivå 3

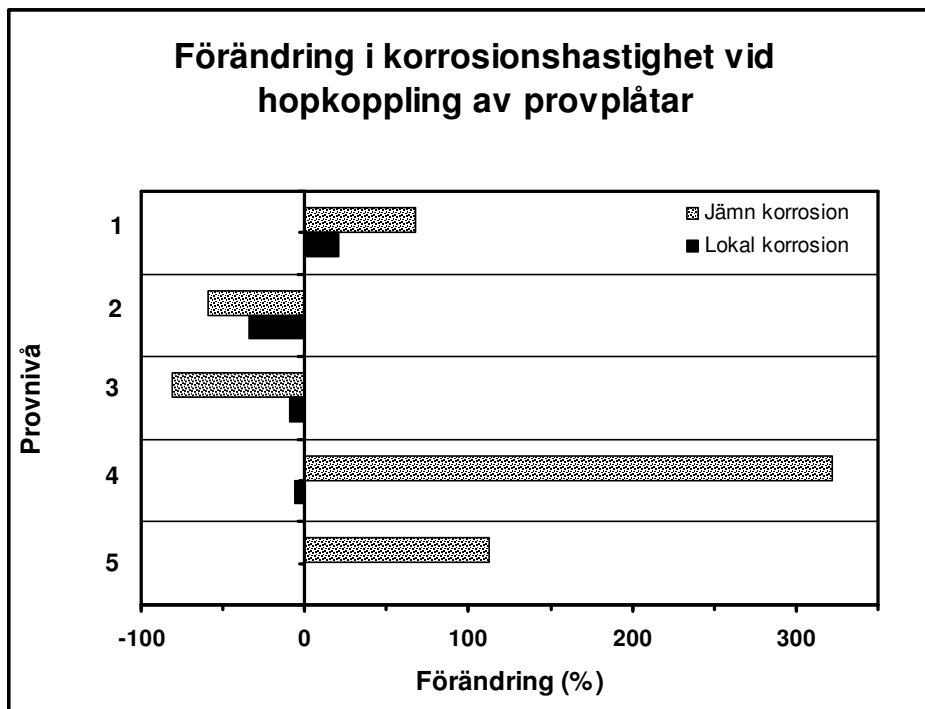
De hopkopplade provplåtarna på nivå 3 har varit katoder i den galvaniska cellen och har erhållit ett påtagligt om än inte ett fullständigt katodiskt skydd, **figur 14**. Den katodiska strömtätheten varierade mellan 30 och 40 mA/m². Korrosionshastigheten för icke hopkopplade provplåtar var 61 respektive 104 µm/år med medelvärdet 83 µm/år. För att uppnå fullständigt katodiskt skydd krävs skyddsströmtätheten 71 mA/m². Den uppmätta skyddsströmtätheten på cirka 35 mA/m² utgör 49 % av det teoretiskt erforderliga värdet.

På *nivå 3* minskade den jämna korrosionshastigheten med 81 % vid hopkoppling. Skyddsgraden för det katodiska skyddet blev alltså 81 %. Den lokala korrosionshastigheten minskade med 9 % och var i stort oförändrad vid hopkoppling av provplåtarna. Hopkopplingen av provplåtar har alltså betydligt större effekt på den jämna korrosionshastigheten än på den lokala.

Jämförelse mellan okopplade och kopplade plåtar



Figur 26. Jämförelse mellan jämn och lokal korrosionshastighet för försök 1 och 2.



Figur 27. Procentuell förändring (ökning eller minskning) av jämn och lokal korrosionshastighet vid hopkoppling av provplåtar. Förändringarna har beräknats med utgångspunkt från korrosionshastigheterna i fritt okopplat tillstånd.

8.4.4 Nivå 4

De hopkopplade provplåtarna på *nivå 4* har varit anoder i den galvaniska cellen, se **figur 15**. Den jämna korrosionshastigheten ökade kraftigt med 323 % från 10 till 44 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling. Korrosionen orsakad av strömbelastning dominerade över egenkorrosionen på provplåtarna. Trots att den jämna korrosionen ökade kraftigt förblev den lokala korrosionshastigheten opåverkad av hopkopplingen, den minskade istället något (6 %), men var fortfarande mycket hög, 2150 $\mu\text{m}/\text{år}$. Korrosionen orsakad av luftningsceller påverkade således kraftigt den jämna korrosionshastigheten, men saknade i stort sett betydelse för den lokala korrosionshastigheten.

8.4.5 Nivå 5

På *nivå 5* har de hopkopplade provplåtarna fungerat som anoder i den galvaniska cellen, **figur 15** och den jämna korrosionshastigheten ökade med 112 % från 7 till 16 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling. Korrosionen orsakad av strömbelastning dominerade också över egenkorrosionen på denna nivå liksom på *nivå 4*. Det förkom ingen lokal korrosion på denna nivå för vare sig okopplade eller hopkopplade provplåtar.

8.5 Galvanisk korrosion

Korrosionshastigheterna för stålstängerna i försök 3 ökade kraftigt från 39 $\mu\text{m}/\text{år}$ i okopplat tillstånd till 151 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid sammankoppling med kopparstång, **tabell 4**. Korrosionen orsakad av egenkorrosion var vidare av samma storlek som korrosionen orsakad av strömbelastning. Andelen korrosion på grund av strömbelastning var 45 respektive 60 %. Egenkorrosionen på de hopkopplade stängerna (83 respektive 62 $\mu\text{m}/\text{år}$) var betydligt högre än korrosionen på den fristående stängen (39 $\mu\text{m}/\text{år}$). Egenkorrosionen vid galvanisk korrosion var 1,6 respektive 2,1 gånger större än korrosionshastigheten för den okopplade stängen. Egenkorrosionshastigheten vid galvanisk korrosion är alltså högre än korrosionshastigheten vid fri korrosion utan hopkoppling till annan metall.

Vid galvanisk koppling mellan två metaller kommer anodens (i detta fall stålets) elektropotential att förskjutas i positiv riktning från metallens korrosionspotential i okopplat tillstånd till ett mera positivt värde. Detta betyder att egenkorrosionen vid galvanisk korrosion sker vid ett mera positivt värde på elektropotentialen än vid "vanlig" korrosion utan hopkoppling till annan metall. Att elektropotentialen förskjuts i positiv riktning innebär att anoden i den galvaniska cellen aktiveras.

8.5.1 Laboratorieundersökning av galvanisk korrosion i USA

I en undersökning av Mansfeld & Kenkel [31] har provplåtar av bland annat kolstål och zink (metall 1) kopplats samman med provplåtar av rostfritt stål, titanlegering (Ti-6Al-4V), koppar, nickel, tenn och kadmium (metall 2) vid exponering i luftad 3,5 mass-% NaCl-lösning vid 21 °C under ett dygn. Provplåtarna i den galvaniska cellen var lika stora, 20 cm^2 . Areaförhållandet var således 1:1. Försöksuppläggningsen beskrivs närmare av Mansfeld, Hengstenberg & Kenkel i [32].

Zhang [33] har diskuterat resultat från Mansfeld & Kenkel [31]. Mansfeld & Kenkel har angett korrosionshastighet orsakad av strömbelastning respektive total massförlustbestämd korrosionshastighet i enheten $\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{dygn})$. Zhang [33] har räknat om dessa korrosionshastigheter till enheten $\mu\text{m}/\text{år}$. Korrosionen orsakad av egenkorrosion har vid Korrosionsinstitutet beräknats från sambandet:

$$\text{Total korr. hast.} = \text{Korr. hast. p g a strömbelastning} + \text{Korr. hast. p g a egenkorrosion}$$

Vidare har också andelen korrosion orsakad av strömbelastning beräknats vid Korrosionsinstitutet. Potentialskillnaden anges i undersökningen som skillnaden i korrosionspotential mellan ädlare metall och oädlare metall före hopkoppling av metallerna:

$$E = E_{\text{ädlare}} - E_{\text{oädlare}}$$

där

E = potentialskillnad, V

$E_{\text{ädlare}}$ = korrosionspotential hos ädlare metall, V (SCE)

$E_{\text{oädlare}}$ = korrosionspotential hos oädlare metall, V (SCE)

Resultaten från undersökningarna visas i **tabell 6**. Trots den mycket korta exponeringstiden kan flera intressanta resultat utläsas.

Vid sammankoppling av kolstål med annan metall var kolstålet anod i den galvaniska cellen utom i försöken med kadmium och zink. Vid sammankoppling med kadmium och zink fungerade kolstålet som katod i den galvaniska cellen. Vid sammankoppling av zink med annan metall var zinken i samtliga fall anod i den galvaniska cellen.

Korrosionshastigheterna för både kolstål och zink ökade kraftigt vid sammankoppling med annan metall. Undantagen var sammankoppling av kolstål med kadmium respektive zink. I dessa försök minskade korrosionshastigheten hos kolstålet. Kolstålet har särskilt vid sammankoppling med zink erhållit ett nästan fullständigt katodiskt skydd.

Vid sammankoppling av kolstål med annan metall minskade den totala massförlustbestämda korrosionshastigheten för kolstålet i följande ordning vid hopkoppling:

Koppar > Nickel > Rostfritt stål > Titanlegering > Tenn

Vid sammankoppling av zink med annan metall minskade den totala massförlustbestämda korrosionshastigheten för zinken i följande ordning vid hopkoppling:

Kolstål > Koppar > Nickel > Titanlegering > Tenn > Rostfritt stål > Kadmium

Det fanns inget entydigt samband mellan potentialskillnaden för de hopkopplade metallerna och korrosionen på den oädlare metallen vid sammankoppling. Korrosionshastigheten för kolstål var större vid hopkoppling med koppar och nickel än med rostfritt stål och Ti-6Al-4V trots större potentialskillnad för dessa legeringar. För zink var korrosionshastigheten störst vid hopkoppling med kolstål trots att potentialskillnaden var bland de minsta för detta metallpar.

Med tanke på att potentialskillnaden var störst vid hopkoppling av både kolstål och zink med rostfritt stål var den vid galvanisk korrosion resulterande korrosionshastigheten måttlig för båda metallerna vid sammankoppling med rostfritt stål.

Det kan konstateras att egenkorrosionen vid galvanisk korrosion är mycket större än korrosion vid fritt, okopplat tillstånd. För försöken med sammankoppling av kolstål med annan metall var egenkorrosionen betydligt större än korrosionen orsakad av strömbelastning. För zinken var variationen i andelen korrosion på grund av strömbelastning större än för kolstål.

Tabell 6. Uppdelning av korrosionshastigheter i korrosion på grund av strömbelastning och egenkorrosion för provplåtar av kolstål och zink (metall 1) vid hopkoppling till annan metall (metall 2) vid exponering i luftad 3,5 mass-% NaCl-lösning vid 21 °C under ett dygn. Areal hos de hopkopplade provplåtarna var lika stora. Korrosionshastigheten anges också för provplåtar i fritt okopplat tillstånd för kolstål och zink. Potentialskillnaden avser skillnaden i korrosionspotential mellan den ädlare och den oädlare metallen före hopkoppling av metallerna. Data från Zhang [33].

Metaller vid hopkoppling		Potential- skillnad mV	Korrosionshastighet för metall 1			Andel %
Metall 1	Metall 2		Korr. hast. p g a strömbe- lastning	Korr. hast. p g a egenkor- rosion	Total korrosions- hastighet	
Kolstål¹ Korrosionshas- tighet i fritt till- stånd utan hop- koppling: <i>90 µm/år</i>	Rostfritt stål ²	439	119	506	625	19
	Ti-6Al-4V ³	338	79	510	589	13
	Cu ⁴	316	343	917	1260	27
	Ni ⁵	299	341	709	1050	32
	Sn ⁶	69	122	459	581	21
	Cd ⁷	- 221	0	38	38	0
	Zn ⁸	- 483	0	14	14	0
Zink⁸ Korrosionshas- tighet i fritt till- stånd utan hop- koppling: <i>101 µm/år</i>	Rostfritt stål ²	905	244	461	705	35
	Ni ⁵	817	990	400	1390	71
	Cu ⁴	811	1065	385	1450	73
	Ti-6Al-4V ³	729	315	500	815	39
	Kolstål ¹	483	1060	490	1550	68
	Sn ⁶	435	320	490	810	40
	Cd ⁷	258	600	60	660	91

- 1) Kolstål AISI-SAE beteckning 4130 (UNS nummer G41300)
- 2) Rostfritt stål typ 304L (UNS nummer S30403) med riktanalysen krom (Cr) 19 mass-% och nickel (Ni) 10 mass-%
- 3) Titanlegering innehållande 6 mass-% aluminium (Al) och 4 mass-% vanadin (V)
- 4) Koppar OFHC (syrefri koppar)
- 5) Nickel 270 (UNS nummer N02270)
- 6) Tenn 99,999 mass-%
- 7) Kadmium 99,97 mass-%
- 8) Zink 99,9 mass-%.

Vid galvanisk korrosion är således egenkorrosionen större än korrosionen vid fritt tillstånd utan sammankoppling. Potentialförskjutningen i positiv riktning för anoden vid galvanisk korrosion medför att anoden korroderar i aktivt tillstånd. Det bildas således inga skyddande korrosionsprodukter på metallytan. Att denna potentialförskjutning i positiv riktning, som stimulerar egenkorrosionen, spelar en mycket stor roll vid galvanisk korrosion framgår av det faktum att egenkorrosionen ofta är större eller lika stor, som korrosionen orsakad av strömbelastning.

8.6 Slutsatser från laboratorieundersökningarna

Provplåtar placerades på fem olika nivåer (*nivå 1* till *5*) i provkärlen. *Nivå 1* fanns högst upp i kärlet och *nivå 5* längst ned i kärlet. Jorden på *nivå 5* var vattenmättad och vattenhalten minskade därefter successivt för provnivåer högre upp i kärlet. På *nivå 1* var jorden ”torr” med mycket låg vattenhalt.

8.6.1 Okopplade provplåtar av stål

Korrosionens beroende av vattenhalten på okopplade provplåtar av stål (fritt exponerade provplåtar) kan sammanfattas enligt följande:

Hög vattenhalt	* Låg jämn korrosion * Låg lokal korrosionshastighet
Vattenhalt cirka 7 mass-%	* Mycket hög jämn korrosion * Mycket kraftig gropfrätning
Låg vattenhalt	* Måttlig jämn korrosion
Vattenhalt < 7 mass-%	* Påtaglig gropfrätning

Den högsta korrosionshastigheten erhöles på *nivå 3* med vattenhalt cirka 7 mass-% och den lägsta korrosionshastigheten på *nivå 5* med vattenmättad jord. Korrosionshastigheten var också låg på *nivå 4*.

8.6.2 Hopkopplade provplåtar av stål

Vid hopkoppling av provplåtar av stål bildades en galvanisk cell av typen luftningscell.

Det sker en utjämning mellan korrosionshastigheterna på provplåtarna vid hopkopplingen. Det fanns ingen provplåt med lika hög jämn korrosionshastighet som vid vattenhalten 7 mass-% vid försöket med okopplade provplåtar. Det fanns heller ingen provplåt med lika låg jämn korrosionshastighet, som i vattenmättad jord vid försöket med okopplade provplåtar.

Vid hopkoppling av provplåtar fungerade provplåtarna på de två nedersta provnivåerna (*nivåerna 4 och 5*) med högsta vattenhalten som anoder i den galvaniska cellen (luftningscellen) och korroderat på grund av strömbelastningen. Provplåtarna på *nivåerna 2*

och 3 har varit katoder i den galvaniska cellen och erhållit visst katodiskt skydd. Strömmen för provplåtarna på nivå 1 med lägsta vattenhalten har varierat omkring noll. Provplåtarna på nivå 1 har i huvudsak korroderat oberoende av de andra provplåtarna på de olika provnivåerna. Plåtarna särskilt på nivå 1, men också på nivå 2, hade endast i liten omfattning fungerat som katoder.

Provplåtarna på nivå 3 hade tillsammans med provplåtarna på nivå 4 bildat i stort sett egna luftningsceller, där provplåtarna på nivå 3 verkat som katoder och provplåtarna på nivå 4 som anoder.

Vid korrosion orsakad av luftningsceller och galvanisk korrosion (bimetallkorrosion) kan den totala korrosionen delas upp i korrosion orsakad av strömbelastning och egenkorrosion:

$$\text{Total korrosion} = \text{Korrosion orsakad av strömbelastning} + \text{Egenkorrosion}$$

Med egenkorrosion menas korrosion utan påverkan av strömbelastning. Egenkorrosionen vid galvanisk korrosion eller vid korrosion orsakad av luftningsceller är inte samma sak som "vanlig" korrosion hos ett okopplat föremål, som inte utsätts för galvanisk korrosion eller korrosion orsakad av luftningsceller.

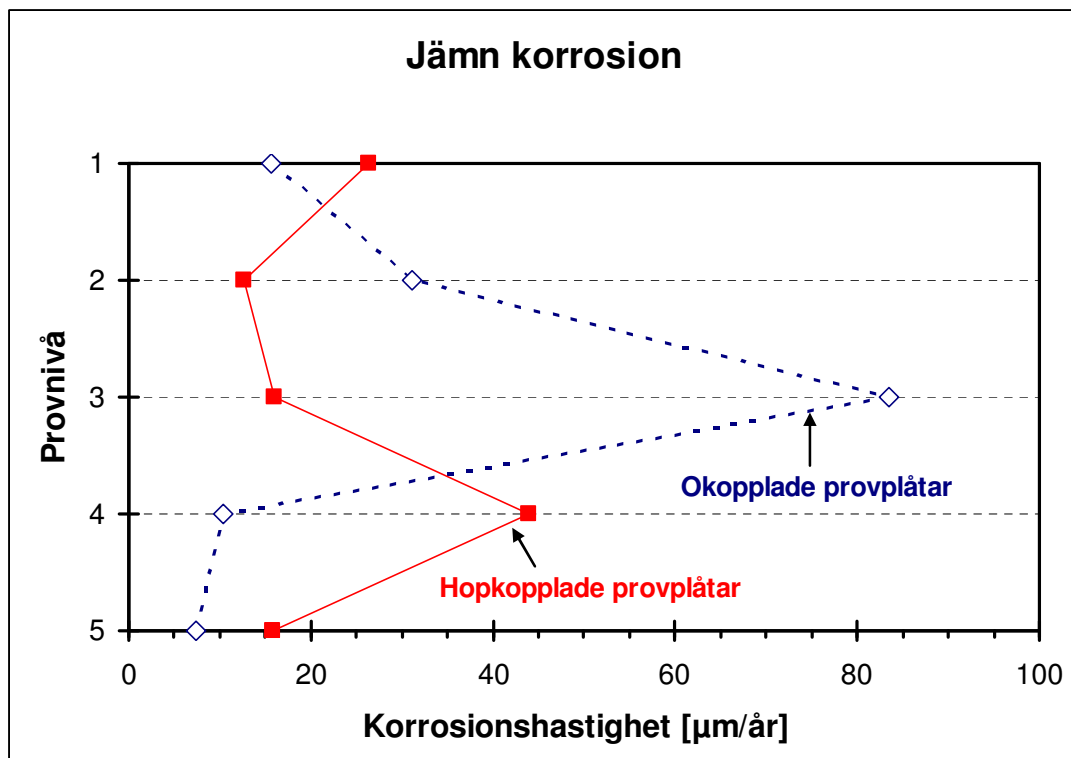
Korrosion orsakad av strömbelastning förekom på provnivå 4 och 5. På dessa nivåer dominerade också korrosionen orsakad av strömbelastning över egenkorrosionen. Egenkorrosionen vid hopkoppling av provplåtar var av samma storlek, som korrosionshastigheten för okopplade provplåtar.

Den jämna korrosionshastigheten på olika provnivåer jämförs för okopplade provplåtar (försök 1) och hopkopplade provplåtar (försök 2) i **figur 28**. Motsvarande jämförelse görs för maximal lokal korrosionshastighet på olika provnivåer i **figur 29**.

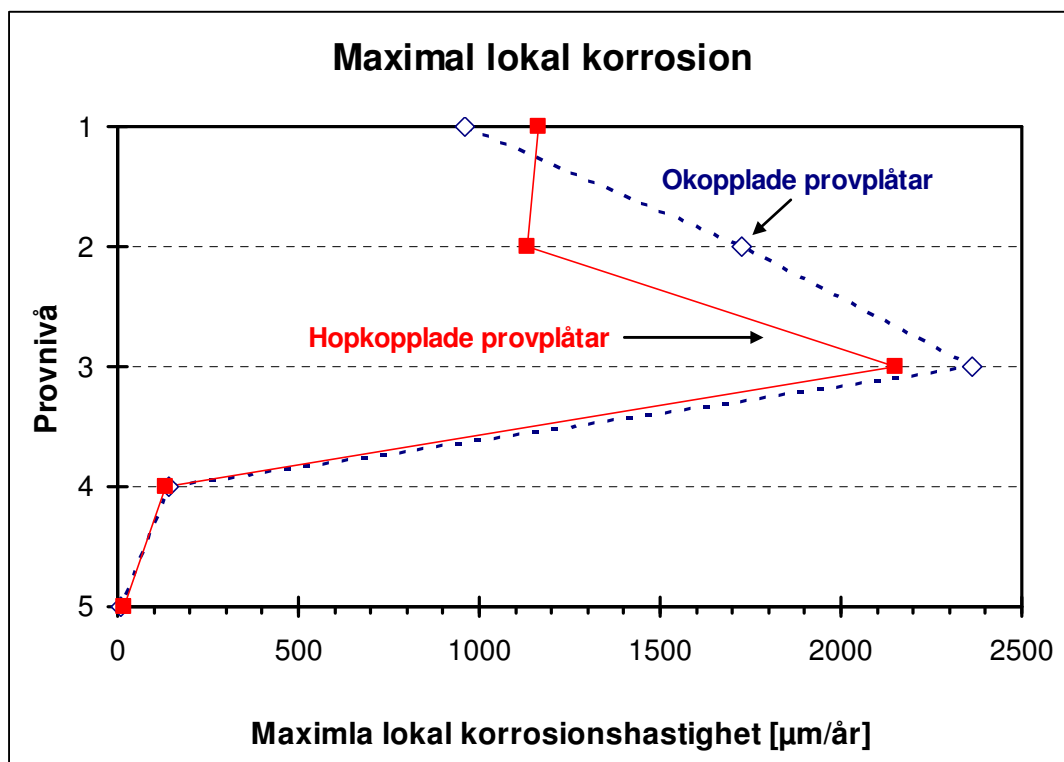
8.6.3 Galvanisk korrosion på stål

Korrosionshastigheterna för stålstängerna ökade kraftigt från cirka 40 $\mu\text{m}/\text{år}$ i okopplat tillstånd till 150 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid sammankoppling med kopparstänger. Korrosionshastigheten var alltså 3,9 gånger större – ökningen var 290 % – vid sammankoppling med koppar.

Korrosionen orsakad av egenkorrosion var ungefär lika stor, som korrosionen orsakad av strömbelastning. Egenkorrosionen på de hopkopplade stålstängerna var betydligt högre än korrosionen på den fristående stålstången. Egenkorrosionen vid galvanisk korrosion var ungefär dubbelt så stor, som korrosionshastigheten för den okopplade stäng- en. Egenkorrosionshastigheten vid galvanisk korrosion var alltså högre än korrosions- hastigheten vid fri korrosion utan hopkoppling till annan metall.



Figur 28. Jämförelse av jämn korrosionshastighet på olika provnivåer för okopplade provplåtar (försök 1) och hopkopplade provplåtar (försök 2).



Figur 29. Jämförelse av maximal lokal korrosionshastighet på olika provnivåer för okopplade provplåtar (försök 1) och hopkopplade provplåtar (försök 2).

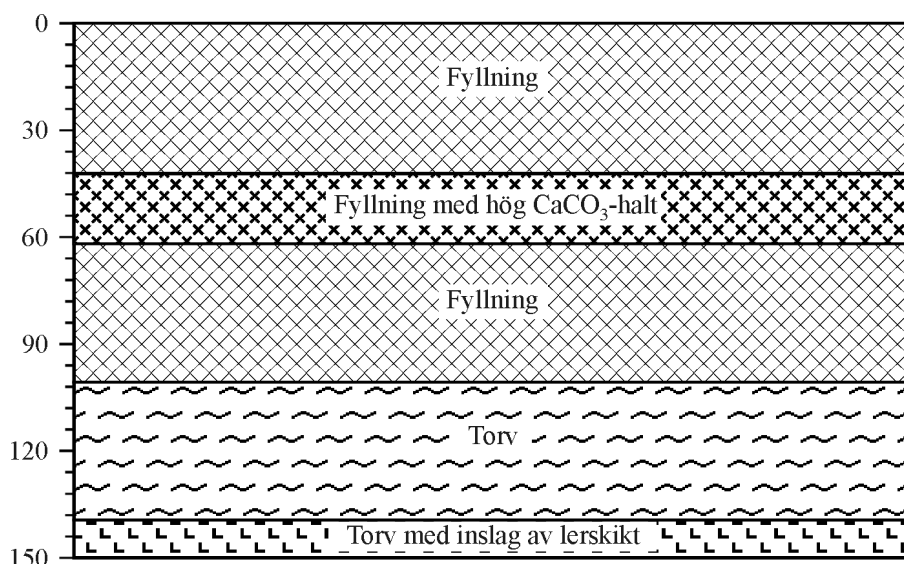
9 Fältförsök med luftningsceller i fyllningsjord i Göteborg

För att komplettera resultaten från laboratorieundersökningarna beskrivs nedan ett fältförsök med luftningsceller.

9.1 Försöksområde

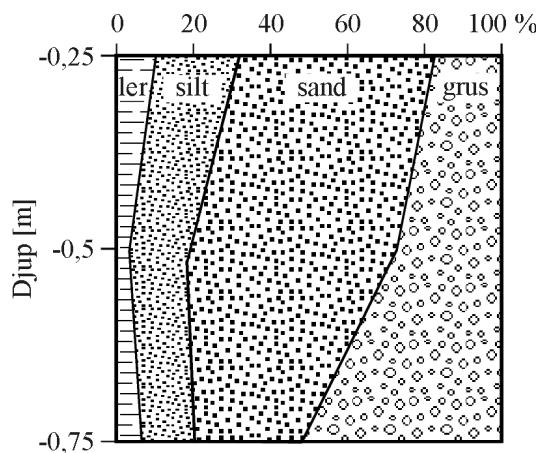
Fältförsöket med luftningsceller har utförts i fyllningsjord i stadsmiljö i Göteborg i ett samarbetsprojekt mellan Avdelningen för vattenvårdsteknik, Institutionen för anläggning och miljö, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm, Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg och Korrosionsinstitutet [34, 35].

Fältförsöket har utförts i ett område i direkt anslutning till Chalmersområdet. Området är gräsbevuxet och ligger vid Sven Hultins gata. De ytliga jordlagren inom försöksområdet består av 1 – 1,5 m tjockt lager fyllningsmaterial som överlagrar den naturligt avsatta jorden bestående av kärrtorv med visst lerinnehåll. En schematisk jordlagerprofil visas i **figur 30**. Fyllningsjorden karaktäriseras av en moränliknande kornstorleksfördelning, **figur 31**. I fyllningsjorden dominerar sand- och grusfraktionerna och den benämns lerig grusig sand. Förutom naturliga jordarter fanns byggnadsavfall: tegelstenar, träbitar och järnskrot i fyllningsjorden. Dessutom återfanns skalrester i jorden. Skalförande skikt i leran är vanligt förekommande i Göteborgstrakten och representerar en arktisk-boreal fauna.



Figur 30. Jordlagerprofil vid provningsplatsen med fyllningsjord. Djupet anges i cm.

Fältförsöket med luftningsceller har utförts i den omättade zonen. Grundvattennivån varierade mellan 2 – 3 m under markytan. Korrosionsmiljön med bland annat kemiska analyser av jord, markvatten och grundvatten har noggrant beskrivits i referens [8, 9, 10, 11, 12].



Figur 31. Procentuell fördelning av de olika kornstorleksfraktionerna i fyllningsjorden vid försöksområdet CTH.

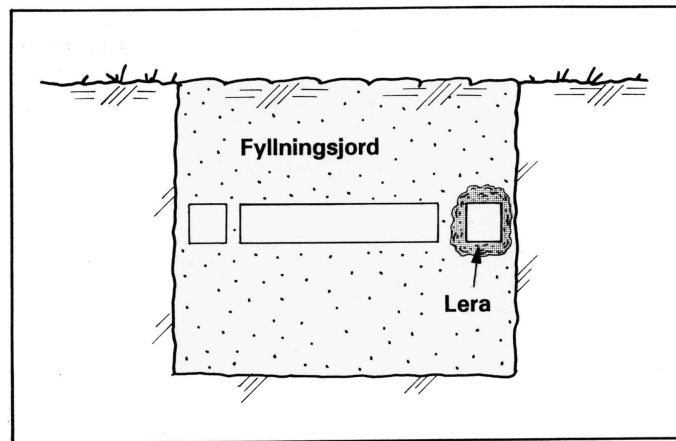
9.2 Utförande

Luftningscellerna skapades genom att två provplåtar av kallvalsat kolstål, SIS stål 13 16-32 enligt den nu indragna svenska standarden SIS 14 13 16 [36], förbands elektriskt med en kabel. Det finns ingen direkt motsvarighet till SIS stål 13 16-32 i europa-standardiseringen. Den ena provplåten låg i fyllningsjord, medan den andra var inbäddad i en utplacerad stor lerklump med siltig lera.

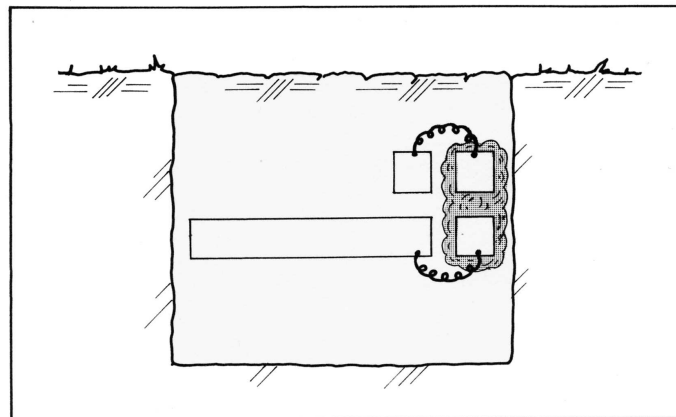
Inverkan av areaförhållandet mellan provplåtarna i fyllningsjord respektive siltig lera undersöktes genom att skapa luftningsceller med olika stora provplåtar i den permeabla fyllningsjorden. Alla provplåtar i siltig lera hade måtten 100 x 100 mm med arean 0,02 m². Hälften av provplåtarna i fyllningsjord var små och hade måttet 100 x 100 mm med arean 0,02 m², medan hälften var stora och hade måtten 1000 x 100 mm med arean 0,2 m². Tjockleken hos alla provplåtar var 2 mm. Hälften av luftningscellerna hade därmed areaförhållandet 1:1 och hälften 10:1 mellan provplåtarna i fyllningsjord respektive siltig lera.

I undersökningen exponerades både okopplade och hopkopplade provplåtar stående på djupet 1,1 m (avstånd från markytan till provplåtarnas övre kant). I fyllningsjord exponerades både små (area 0,02 m²) och stora (area 0,2 m²) okopplade provplåtar, medan i siltig lera exponerades enbart små okopplade provplåtar, **figur 32**. Vid undersökningen med luftningsceller exponerades små (area 0,02 m²) provplåtar hopkopplade med både små (area 0,02 m²) och stora (area 0,2 m²) provplåtar, **figur 33**.

Lerklumpen, som enbart små provplåtar (både okopplade och hopkopplade provplåtar) var instuckna i, bestod av naturlig siltig lera från Ringön, Göteborg och hade måtten 90 x 90 cm och ett djup på cirka 30 cm. Den siltiga leran innehöll 30 mass-% ler, 51 mass-% silt och 19 mass-% sand. Provplåtarna i fyllningsjorden låg på 20 cm avstånd från lerklumpen och 50 cm avstånd från provplåtarna i siltig lera, **figur 37**.



Figur 32. Exponering av små (area 0,02 m²) och stora (area 0,2 m²) okopplade provplåtar i fyllningsjord och av små okopplade provplåtar i en lerklump med siltig lera.



Figur 33. Försök med luftningscell i fyllningsjord. Små (area 0,02 m²) provplåtar i lerklumpen med siltig lera exponeras hopkopplade med små (area 0,02 m²) respektive stora (area 0,2 m²) provplåtar i fyllningsjord.

9.3 Mätning av resistivitet i jorden

Resistiviteten hos fyllningsjorden i Göteborg mättes med olika laboriemetoder, som använts i Sverige vid korrosionsundersökningar [10, 11].

- Ledningstal [37, 38]
- Vattenfalls metod [39, 40]
- Televerkets metod [41]
- Box-metoden (soil-box) [26, 42] med:
 - *Vattenmättad jord*
 - *Naturfuktig jord.*

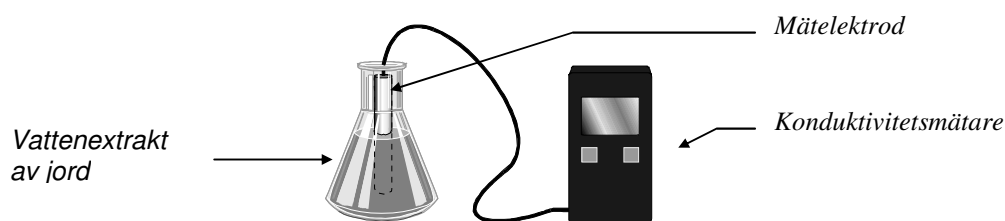
Vid nedgrävning av provplåtar och annan instrumentering togs jordprover från nivån 0,25 m under markytan och nedåt var 25 cm ned till djupet 1,5 m. Resistiviteten hos dessa jordprov analyserades med box-metoden (soil-box) med både naturfuktig jord och vattenmättad jord samt med ledningstalsmetoden [8, 9].

Vid intag av provplåtar togs jordprov i anslutning till varje exponerad provplåt. Jordprover togs på djupen 0,5 m, 1,1 m och 1,5 m under markytan. Jordresistiviteten analyserades här med fyra metoder: ledningstalsmetoden, Vattenfalls metod, Televerkets metod och med box-metoden (soil-box) med både naturfuktig jord och vattenmättad jord [10, 11].

9.3.1 Använda resistivitetsmetoder

Ledningstal definieras som konduktiviteten hos ett vattenextrakt av jord multiplicerat med 10, detta för att korrigera för utspädningseffekten. Ledningstalet anses motsvara jordvattnets (porvattnets) konduktivitet och är ett mått på jordens totala salthalt. Jordlösningen bereds genom att 10 g finjord (< 2 mm) blandas med 90 ml avjoniserat vatten. Blandningen skakas under 1 h varefter jorden får sedimentera under minst 30 min. Därefter dekanteras extraktet av och dess ledningsförmåga bestäms [37, 38] (**figur 34**). I denna undersökning har konduktiviteten omräknats till resistivitet.

Enligt **Vattenfalls metod** blandas avjoniserat vatten och jord i förhållandet 1:1. Vid analysen blandades 40 g jord med 40 ml vatten som skakades under 1 timme. När jorden sedimenterat mäts extraktets konduktivitet. I denna undersökning har konduktiviteten omräknats till resistivitet. Enligt metoden rekommenderas ett förhållande på en del jord till fem delar vatten ifall jorden har ett högt organiskt innehåll, Arrhenius [39, 40].



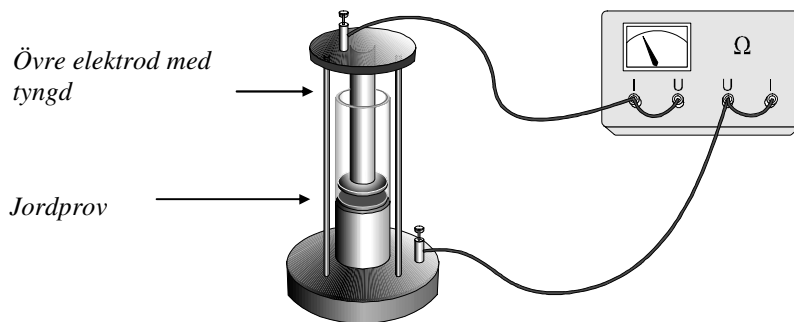
Figur 34. Konduktivitetmätare för bestämning av resistivitet enligt ledningstalsmetoden och enligt Vattenfalls metod.

Televerkets metod, har utarbetats och använts på Televerket för att bestämma jordens resistivitet i samband med läggning av telekablar. Vid analysen pulveriserades den siktade jorden, varefter den vattenmättades till sin maximala vattenkapacitet. Provet får därefter stå under ett dygn för att sedan överföras till mätcellen, enligt **figur 35**. Provet placeras mellan 2 stycken plana elektroder med ett tryck på den övre elektroden på 19,6 kPa. Trycket motsvarar ungefär trycket av en jordmassa på 60 cm markdjup, vilket motsvarar läggningsdjupet för telekablar, Thielers [41].

Resistiviteten för Televerkets metod, ρ , beräknades från den uppmätta resistansen, R , enligt:

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (\Omega m)$$

där: $A = \text{plattans area} \quad (4,15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2)$
 $l = \text{jordprovets höjd} \quad (m)$



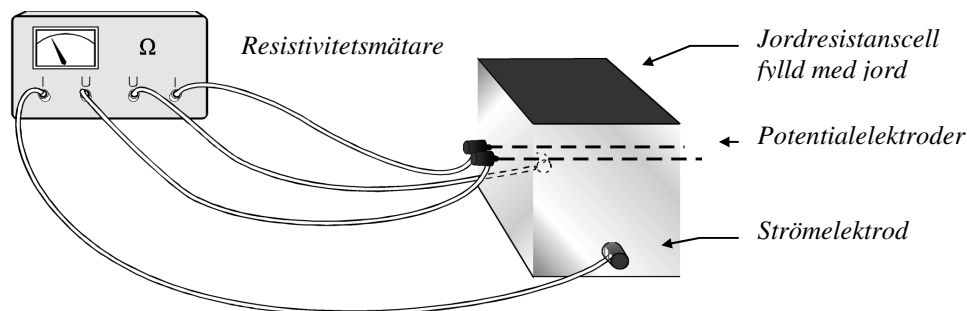
Figur 35. Mätcell för mätning av resistivitet enligt Televerkets metod.

Box-metoden bygger på samma princip som Weners 4-elektrods metod. Mätningen sker i en jordresistanscell (soil box) som utgörs av en låda av plexiglas med två motstående sidor av metall (strömelektroder), i lådan finns två inre elektroder (potentialelektroder), enligt **figur 36**. Soil boxen packas med jord, varefter de fyra polskruvarna ansluts till en 4-polig resistansmätare. Mätströmmen sänds ut genom de två strömelektroder och potentialfallet mäts mellan de två inre elektroderna, von Baeckmann & Fleig [26] och Camitz [42]. Resistiviteten, ρ , beräknas från den uppmätta resistansen, R , enligt:

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (\Omega m)$$

där $A = \text{strömelektrodp Plattans area} \quad (2,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2)$
 $l = \text{avståndet mellan potentialelektroderna} \quad (0,02 \text{ m})$

Resistivitetsmätningarna har utförts med *naturfuktig* respektive *vattenmättad jord* vid normal packningsgrad, där boxen packas så att hela boxen är fylld med jord. Resistiviteten sjunker med ökande vattenhalt, mätningen vid vattenmättnad ger därför det lägsta resistivitetsvärdet som kan förekomma för den aktuella jorden.



Figur 36. Box-metoden för bestämning av resistivitet.

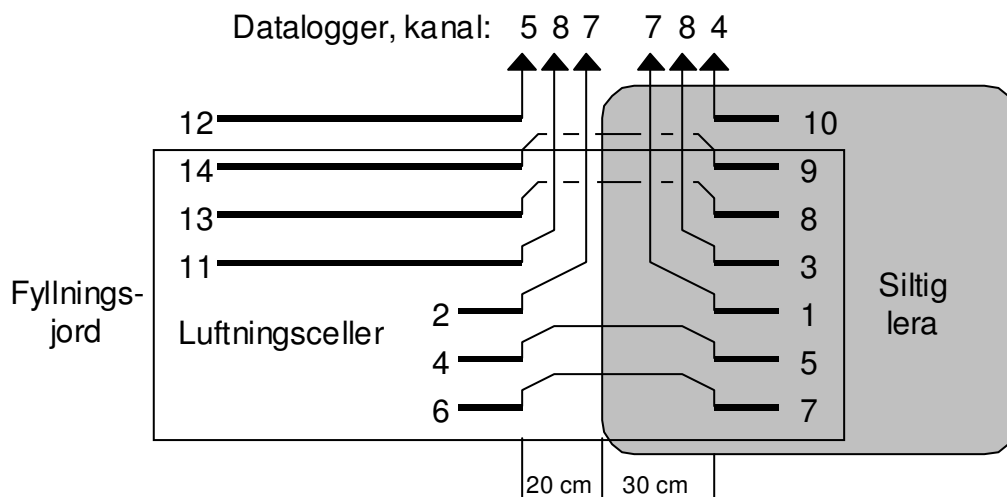
9.4 Mätning av ström och potential

Under exponeringen, som pågick i 2,68 år, mättes manuellt en gång i veckan cellström mellan provplåtarna och korrosionspotential för liten och stor provplåt i fyllningsjord och för liten provplåt i siltig lera. Vidare mättes blandpotentialen med provplåtarna hopkopplade.

I **figur 37** visas en schematisk bild av provgropen som grävdes upp efter 2,68 års exponering. Provplåtarna 11 till 14 var stora plåtar med arean $0,2 \text{ m}^2$, övriga provplåtar (plåt 1 till 10) var små plåtar med arean $0,02 \text{ m}^2$. I gropen fanns två hopkopplade luftningsceller med liten provplåt i fyllningsjorden (provplåtar 4 och 5 samt provplåtar 6 och 7) och två hopkopplade luftningsceller med stor provplåt i fyllningsjorden (provplåtar 13 och 8 samt 14 och 9).

Luftningsceller med liten provplåt i fyllningsjorden (provplåt 2 och 1) och med stor provplåt i fyllningsjorden (provplåt 11 och 3) var hopkopplade via en datalogger. Dataloggern, som var placerad i ett mätskåp i försöksområdet, användes för potentialmätningar, varvid provplåtarnas potential mättes relativt en referenselektrod, mättad koppar/kopparsulfatelektrod (Cu/CuSO_4), som var nedgrävd i fyllningsjorden i närheten av provplåtarna på djupet 1,1 m.

För de hopkopplade elektrodparen bestående av provplåtarna 2 och 1 samt provplåtarna 11 och 3 mättes blandpotentialen. Korrosionspotential mättes för okopplade provplåtar: liten respektive stor provplåt i fyllningsjord och liten provplåt i siltig lera. Strömmen mellan provplåtarna i luftningscellerna mättes manuellt på samma elektrodpar som användes för blandpotentialmätningarna (elektrodparen bestående av provplåtarna 2 och 1 samt provplåtarna 11 och 3).



Figur 37. Anslutningar av provplåtar till datalogger. Provplåtarna 10 och 12 är okopplade provplåtar och inte ansluten till någon luftningscell. I figuren anges avstånd mellan små provplåtar i lerklumpen med siltig lera och små respektive stora provplåtar i fyllningsjorden.

Vid fältförsökets avslutande efter 2,68 års exponering utfördes en serie mätningar på luftningsceller. För luftningscellen med liten provplåt i fyllningsjorden (provplåt 2) och liten provplåt i siltig lera (provplåt 1) och för luftningscellen med stor provplåt i fyllningsjorden (provplåt 11) och liten provplåt i siltig lera (provplåt 3) mättes strömmen mellan provplåtarna (cellström) och resistansen mellan provplåtarna (cellresistans). Vidare mättes korrosions- och fränslagspotential för alla fyra provplåtarna samt blandpotentialen med provplåtarna hopkopplade. Se figur 31 för provbeteckningar.

9.5 Resultat och diskussion

Från strömmätningarna mellan hopkopplade provplåtar framgick att provplåtarna i siltig lera alltid var anod i luftningscellen. Detta gäller såväl vid hopkoppling med små som stora provplåtar i fyllningsjorden. Provplåtarna i fyllningsjorden var alltså katoder i luftningscellen.

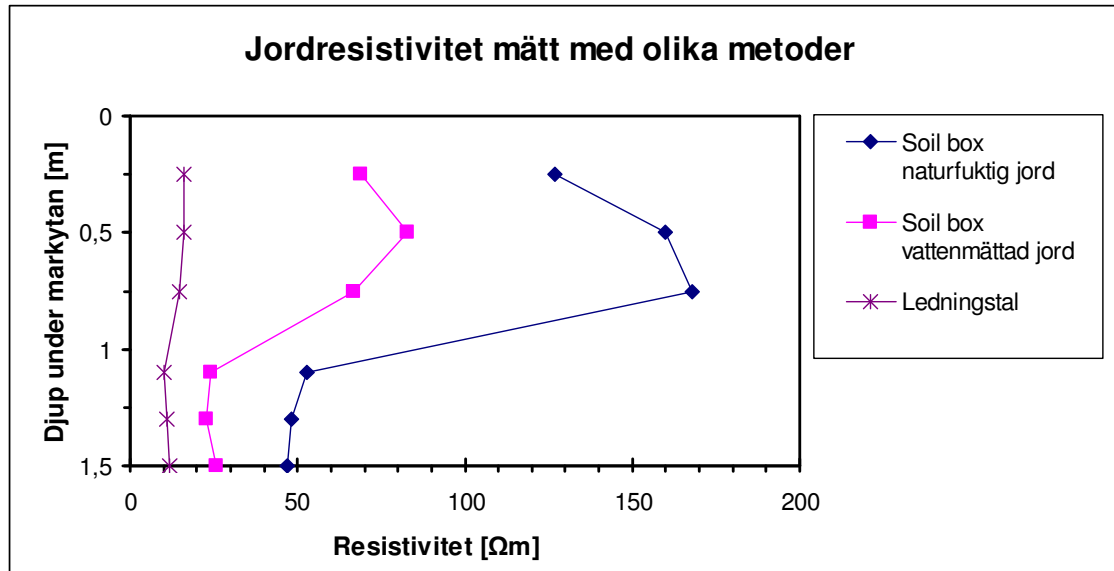
9.5.1 Resistivitetsmätningar

Resistivitetsmätningarna på laboratorium kan delas in i två stycken huvudgrupper.

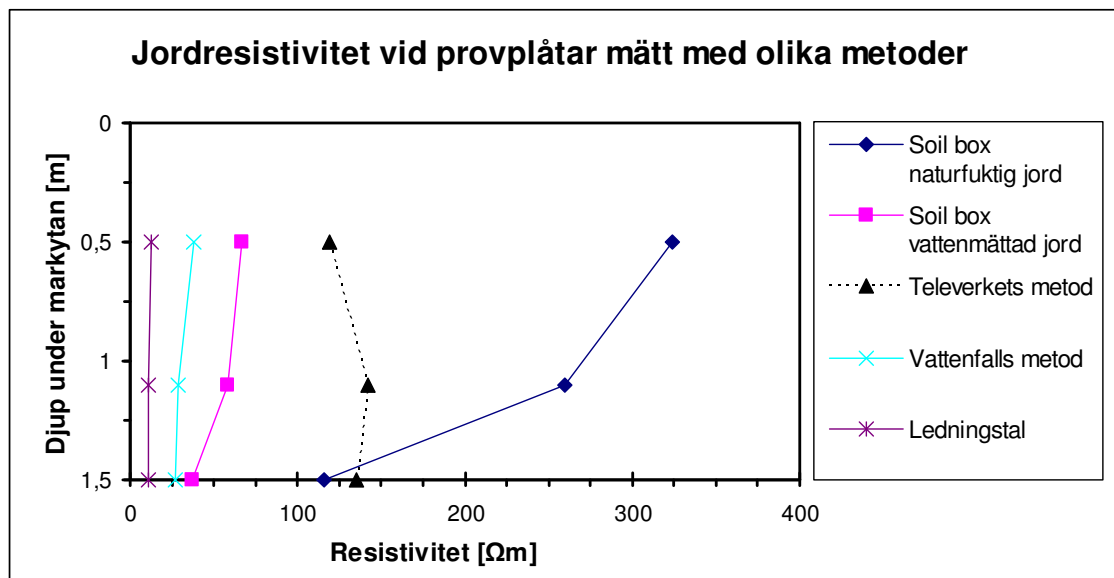
- Resistivitetsmätning utförd under naturfuktigt tillstånd
- Resistivitetsmätning utförd under vattenmättat tillstånd.

Det är endast en metod, box-metoden – naturfuktig jord som faller inom den första gruppen. De övriga metoderna, box-metoden – vattenmättad jord, ledningstalsmetoden, Televerkets och Vattenfalls metoder utförs alla under vattenmättade förhållande. Ledningstalsmetoden och Vattenfalls metod skiljer sig från de övriga metoderna på så sätt att mätning utförs på jordextraktet (vätskan) och inte på ett jordprov.

I **figur 38** visas redovisas analysresultat från resistivitetsmätningarna vid utsättning av provplåtar [8, 9]. I **figur 39** visas jordresistivitet i anslutning till varje exponerad provplåt. I figuren redovisas medelvärde från sex jordprover på varje provnivå [10, 11].



Figur 38. Uppmätt jordresistivitet med tre olika metoder för jordprov från sex olika djup under markytan vid provningsplatsen med utfylld jord på Chalmersområdet.



Figur 39. Uppmätt jordresistivitet med fem olika metoder för jordprov från tre olika provnivåer under markytan vid provningsplatsen med utfylld jord på Chalmersområdet. I figuren redovisas medelvärde från sex jordprover från varje provnivå.

Resistiviteten mätt med *box-metoden i naturfuktig jord* varierade från 116 Ωm på djupet 1,5 m till 324 Ωm på djupet 0,5 m. I huvudsak minskade resistiviteten med djupet för alla jordprov (18 st jordprover).

Resistivitetsmätningen utförd med *box-metoden i vattenmättad jord* varierade från 37 (1,5 m) till 67 Ωm (0,5 m). I huvudsak minskade resistiviteten med djupet för alla jordprov.

Resistivitet mätt med *Televerkets metod* varierade från 119 (1,5 m) till 142 Ωm (1,1 m). Generellt sett var den högst på nivån 1,1 m, följt av 1,5 och 0,5 m under markytan.

Resistiviteten mätt med *Vattenfalls metod* varierade från 27 (1,5 m) till 38 Ωm (0,5 m) och minskade med ökat djup från markytan. Variationen i resistivitet var mycket liten för alla prover. Skillnaden mellan olika jordprov var betydligt större på nivån 0,5 m under markytan än för de övriga provnivåerna.

Resistivitet mätt som *ledningstal* varierade från 11 (1,1 m och 1,5 m) till 13 Ωm (0,5 m). Generellt sett var skillnaden mellan jordproven mycket liten. Resistiviteten minskade huvudsakligen med djupet under markytan.

De utförda undersökningarna [10, 11] visade att olika resultat erhöles med olika resistivitetsmetoder. Det är därför viktigt att noga ange vilken metod som använts vid resistivitetsmätning.

Sammanfattningsvis kan de olika metoderna ordnas in i följande serie med ökande uppmätt resistivitet:

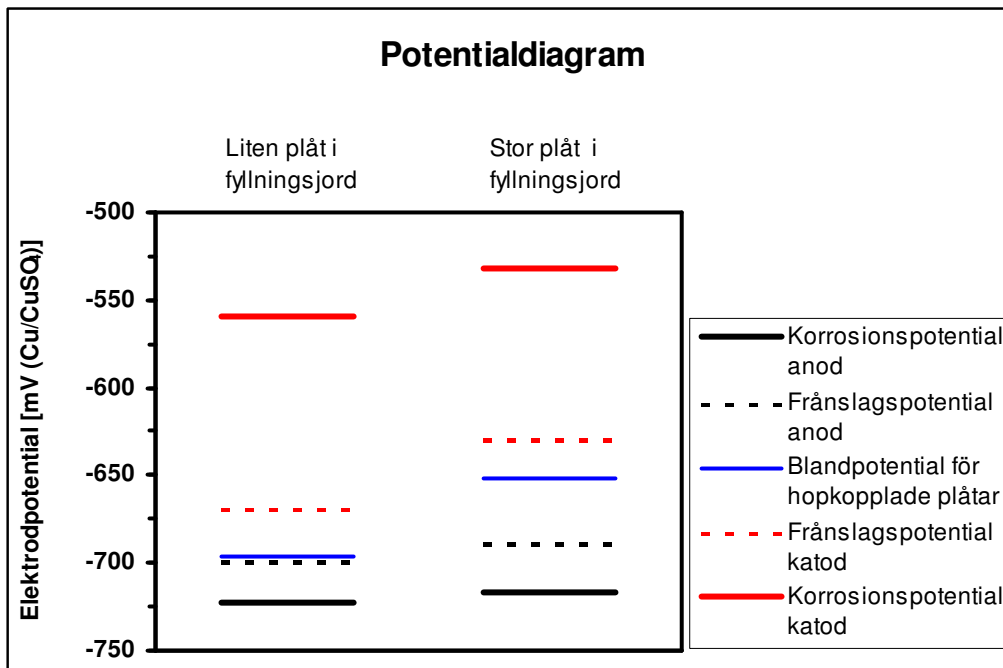
Ledningstal < Vattenfalls metod < Soil-box, vattenmättad jord < Televerkets metod < Soil-box, naturfuktig jord.

9.5.2 Potentialmätningar

Mätning av cellström och cellresistans samt potentialmätningar (korrosions-, frånslags- och blandpotential) gjordes också för hopkopplade provplåtar, **tabell 7**. I **figur 40** visas ett potentialdiagram med sammanställning av potentialmätningar på luftningsceller med olika förhållanden mellan katod- och anodarea.

Den goda överensstämmelsen mellan polspänningen och potentialskillnaden mellan frånslagspotentialer (**tabell 7**) indikerar att de uppmätta frånslagspotentialerna är relevanta.

Korrosionspotentialen (potential utan hopkoppling) är cirka 30 mV ädlare (mera positiv potential) för stor plåt än för liten plåt i fyllningsjorden. Vid hopkoppling av provplåt – gäller för både stor och liten plåt – i fyllningsjord (katod i luftningscellen) med liten provplåt i siltig lera (anod i luftningscellen) försköts potentialen (frånslagspotentialen) cirka 100 mV i negativ riktning från respektive korrosionspotential.



Figur 40. Potentialdiagram med sammanställning av potentialmätningar på luftningsceller med olika förhållanden mellan katod- och anodarea: Korrosions-, frånslags- och blandpotentialer. Potentialmätningarna utfördes för luftningscellen med liten provplåt i fyllningsjorden (plåt 2) och liten provplåt i siltig lera (plåt 1) och för luftningscellen med stor provplåt i fyllningsjorden (plåt 11) och liten provplåt i siltig lera (plåt 3).

Frånslagspotentialerna var kraftigt förskjutna mot respektive blandpotential. Blandpotentialen för kombinationen stor plåt i fyllningsjorden och liten plåt i siltig lera var drygt 50 mV mer positiv än för blandpotentialen för liten stor plåt i fyllningsjorden och liten plåt i siltig lera.

Frånslagspotentialerna för provplåtar – gäller för både hopkoppling med stor och liten plåt – i siltig lera (anoder i luftningscellerna) var förskjutna cirka 25 mV i positiv riktning från respektive korrosionspotential. Polariseringen (förskjutning av potentialen från korrosionspotentialen) vid hopkoppling av provplåtar var alltså betydligt större för provplåtarna i fyllningsjorden (katod i luftningscellen) än för provplåtarna i siltig lera (anod i luftningscellen).

I **tabell 7** anges korrosions- och frånslagspotentialer för anod- och katodplåtarna i luftningscellerna och potentialskillnaden mellan korrosions- respektive frånslagspotentialer mellan elektroderna i luftningscellerna. Potentialskillnaden mellan korrosionspotentialer var 125 – 135 mV större än potentialskillnaden mellan frånslagspotentialer. Det är potentialskillnaden mellan frånslagspotentialer som utgör den drivande kraften i luftningscellen.

Vid praktisk bedömning av riskerna för galvanisk korrosion och korrosion orsakad av luftningsceller får man utgå från potentialskillnaden mellan korrosionspotentialer. I bästa fall finns det uppmätta korrosionspotentialer att tillgå. Det vanligaste är dock att man får göra uppskattningar från någon galvanisk spänningsserie.

Tabell 7. Cellström och cellresistans respektive polspänning mellan provplåtar samt olika elektrodpotentialer för provplåtar vid fältförsök med luftningscell med olika förhållanden mellan katod- och anodarea. Korrosions- och fränslagspotentialer anges för provplåtar i fyllningsjord (anod i luftningscellen) respektive i siltig lera (katod i luftningscellen). Vidare anges blandpotentialer med provplåtarna hopkopplade. Polspänningen beräknades med Ohms lag.

Mätningarna utfördes för luftningscellen med liten provplåt i fyllningsjorden (plåt 2) och liten provplåt i siltig lera (plåt 1) och för luftningscellen med stor provplåt i fyllningsjorden (plåt 11) och liten provplåt i siltig lera (plåt 3). För fränslagspotentialer anges medelvärde (med standardavvikelse) från fyra mätningar. Vid potentialmätningarna användes en mättad koppar/kopparsulfatelektrod (Cu/CuSO₄) som referenselektrod. Mätningarna utfördes vid fältförsökets avslutande efter exponeringstiden 2,68 år.

Vid hopkoppling av provplåtar var plåten i siltig lera anod och provplåten i fyllningsjord katod i luftningscellen. Arean hos provplåtar i fyllningsjorden: liten plåt 0,02 m² och stor plåt 0,2 m². Arean hos provplåtar i siltig lera var alltid 0,02 m².

Förhållande mellan katod- och anodarea	Storlek på provplåt i fyllningsjord	Cellström μA	Cellresistans Ω	Polspänning mV	Katod i fyllningsjord		Anod i siltig lera		Blandpotential mV (Cu/CuSO ₄)	Potentialskillnad		Elektrokemisk polarisation	
					Korrosionspotential mV (Cu/CuSO ₄)	Fränslagspotential mV (Cu/CuSO ₄)	Korrosionspotential mV (Cu/CuSO ₄)	Fränslagspotential mV (Cu/CuSO ₄)		Potentialskillnad mellan korrosionspotentialer mV	Potentialskillnad mellan fränslagspotentialer mV	Anodisk polarisation mV	Katodisk polarisation mV
1:1	Liten	53	508	27	- 559	- 670 (12)	- 723	- 700 (2)	- 696	164	30	23	- 111
10:1	Stor	415	186	77	- 532	- 630 (13)	- 717	- 690 (8)	- 652	185	60	27	- 98

9.5.3 Korrosionshastigheter

I **tabell 8** visas den jämna massförlustbestämda korrosionshastigheten för både okopplade och hopkopplade provplåtar i fyllningsjord och i siltig lera efter exponeringstiden 2,68 år.

Korrosionshastigheterna anges som medelvärde för fyra små okopplade provplåtar i fyllningsjord respektive i siltig lera och som medelvärde från två provplåtar för stora okopplade provplåtar i fyllningsjord. Korrosionshastigheter för hopkopplade provplåtar i luftningscellerna anges för luftningscellen med liten provplåt i fyllningsjorden (provplåt 2) och liten provplåt i siltig lera (provplåt 1) och för luftningscellen med stor provplåt i fyllningsjorden (provplåt 11) och liten provplåt i siltig lera (provplåt 3). Se **figur 37** för provbeteckningar.

Den jämna massförlustbestämda korrosionshastigheten hos anodplåtarna i siltig lera ökade kraftigt med 163 % från 14 till 36 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med liten katodplåt i fyllningsjord och med hela 362 % från 14 till 62 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med stor katodplåt i fyllningsjord. Det kan konstateras att korrosionshastigheten hos anodplåtarna i siltig lera ökade 1,7 gånger när arean hos katodplåtarna ökade 10 gånger.

I **tabell 8** visas uppdelning av den totala massförlustbestämda korrosionshastigheten i korrosionshastighet på grund av strömbelastning och egenkorrosion för provplåtar i siltig lera som var anoder i luftningscellen.

Korrosionen hos anodplåtarna i siltig lera orsakad av strömbelastning var 4,6 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med liten provplåt i fyllningsjorden och 29 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med stor provplåt. Korrosionen hos anoderna orsakad av strömbelastning ökade alltså 6,3 gånger när arean hos katodplåtarna ökade 10 gånger.

Egenkorrosion hos anoden var 31 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med liten provplåt i fyllningsjord och 33 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med stor provplåt. Egenkorrosionen hos anoderna var alltså strängt taget oberoende av katodplåtarna area. En förklaring till detta kan vara att frånslagspotentialerna hos anoden i siltig lera var tämligen lika oavsett koppling till liten eller stor katod i fyllningsjord, **tabell 7**. Frånslagspotentialen hos anoden var – 700 mV (Cu/CuSO₄) vid hopkoppling med liten provplåt i fyllningsjorden och – 690 mV (Cu/CuSO₄) vid hopkoppling med stor provplåt.

För anoderna i luftningscellen var egenkorrosionen större än korrosionen orsakad av strömbelastning. Egenkorrosionen hos anoderna var 6,7 gånger större än korrosion orsakad av strömbelastning vid hopkoppling med liten plåt i fyllningsjorden, men endast 1,1 gånger större vid hopkoppling med stor provplåt. Egenkorrosionen (31 respektive 33 $\mu\text{m}/\text{år}$) var mer än dubbelt så stor som korrosionshastigheten i fritt, okopplat tillstånd (14 $\mu\text{m}/\text{år}$).

Den jämna massförlustbestämda korrosionshastigheten minskade med 49 % från 13 till 6,5 $\mu\text{m}/\text{år}$ för liten katod i fyllningsjord vid hopkoppling med anod i siltig lera. För stor katod i fyllningsjord minskade korrosionshastigheten med 54 % från 15 till 7,9 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling.

Korrosionshastigheten för icke hopkopplade provplåtar i fyllningsjord var 13 $\mu\text{m}/\text{år}$ för liten provplåt och 15 $\mu\text{m}/\text{år}$ för stor provplåt. Ur teoretisk synvinkel blir skyddsströmtätheten vid katodiskt skydd lika stor som korrosionsströmtätheten [29]. För att erhålla ett fullständigt katodiskt skydd krävs alltså skyddsströmtätheten 11 mA/m^2 för liten provplåt i fyllningsjord och 13 mA/m^2 för stor provplåt.

Skyddsgraden för katodiska skyddet av liten provplåt i fyllningsjord blev alltså 49 % och 54 % för stor provplåt. I dessa fall har endast ett ofullständigt katodiskt skydd uppnåtts. Medianvärdena på den uppmätta katodiska strömtätheten var 3,8 mA/m^2 för liten provplåt och 2,4 mA/m^2 för stor provplåt i fyllningsjord vid hopkoppling med provplåt i siltig lera, **tabell 9**. Skyddsströmtätheten var 35 % av den teoretiska skyddsströmtätheten för liten provplåt i fyllningsjord och 19 % för stor provplåt.

Tabell 9. Cellström samt anodisk respektive katodisk strömtäthet för provplåtar vid fältförsök med luftningscell med olika förhållanden mellan katod- och anodarea. Strömmätningarna utfördes för luftningscellen med liten provplåt i fyllningsjorden (plåt 2) och liten provplåt i siltig lera (plåt 1) och för luftningscellen med stor provplåt i fyllningsjorden (plåt 11) och liten provplåt i siltig lera (plåt 3). Vid hopkoppling av provplåtar var plåten i siltig lera anod och provplåten i fyllningsjord katod i luftningscellen. Statistiska parametrar anges för 240 mätvärden.

Statistiska parametrar	Liten katod i fyllningsjord			Stor katod i fyllningsjord		
	Cellström	Anodisk strömtäthet	Katodisk strömtäthet	Cellström	Anodisk strömtäthet	Katodisk strömtäthet
	μA	mA/m^2	mA/m^2	μA	mA/m^2	mA/m^2
Minsta värde	33	1,6	1,6	180	9	0,9
Nedre kvartil	60	3,0	3,0	428	21	2,1
Medianvärde	75	3,8	3,8	483	24	2,4
Övre kvartil	95	4,8	4,8	566	28	2,8
Största värde	382	19,1	19,1	853	43	4,3
Medelvärde	83	4,2	4,2	500	25	2,5
Standardavvikelse	37	1,8	1,8	110	6	0,6

Tabell 8. Korrosionshastigheter och uppdelning av korrosionshastigheter vid fältförsök med luftningscell med olika förhållanden mellan katod- och anodarea. Massförlustbestämda korrosionshastigheter anges för både okopplade och hopkopplade provplåtar i fyllningsjord respektive siltig lera. Jämna korrosionshastigheter uppdelade i korrosion på grund av strömbelastning och egenkorrosion för provplåtar i siltig lera som fungerade som anod i luftningscellen.

Vid hopkoppling av provplåtar var plåten i siltig lera anod och provplåten i fyllningsjord katod i luftningscellen. Arean hos provplåtar i fyllningsjorden: liten plåt 0,02 m² och stor plåt 0,2 m². Arean hos provplåtar i siltig lera var alltid 0,02 m². Exponeringstiden var 2,68 år.

Förhållande mellan katod- och anodarea	Storlek på provplåt i fyllningsjord	Katod i fyllningsjord			Anod i siltig lera			Anod i siltig lera			
		Korrosionshastigheter			Korrosionshastigheter			Uppdelning av korrosionshastigheter			
		Korrosionshastighet		<i>Minskning</i> i korr. hast. vid hopkoppling	Korrosionshastighet		<i>Ökning</i> i korr. hast. vid hopkoppling	Korrosionshastighet			Andel
µm/år		µm/år			µm/år						
		Korr. hast. utan hopkoppling av provplåtar	Korr. hast. med hopkoppling av provplåtar	%	Korr. hast. utan hopkoppling av provplåtar	Korr. hast. med hopkoppling av provplåtar	%	Korr. hast. p g a strömbelastning	Korr. hast. p g a egenkorrosion	Total korrosionshastighet	Korrosion p g a strömbelastning
1:1	Liten	13	6,5	49	14	36	163	4,6	31	36	13
10:1	Stor	15	7,9	54	14	62	362	29	33	62	46

9.6 Slutsatser från fältundersökningen

Luftningscellerna skapades genom att två provplåtar av kallvalsat kolstål förbands elektriskt med en kabel. Den ena provplåten låg i fyllningsjord, medan den andra var inbäddad i en utplacerad stor lerklump med siltig lera.

Inverkan av areaförhållandet mellan provplåtarna i fyllningsjord respektive siltig lera undersöktes genom att skapa luftningsceller med olika stora provplåtar i den permeabla fyllningsjorden. Alla provplåtar i siltig lera hade arean $0,02 \text{ m}^2$. Hälften av provplåtarna i fyllningsjord var små med arean $0,02 \text{ m}^2$, medan hälften var stora med arean $0,2 \text{ m}^2$. Hälften av luftningscellerna hade därmed areaförhållandet 1:1 och hälften 10:1 mellan provplåtarna i fyllningsjord respektive siltig lera.

Provplåtarna i siltig lera var alltid anod i luftningscellen. Detta gäller såväl vid hopkoppling med små som stora provplåtar i fyllningsjorden. Provplåtarna i fyllningsjorden var alltså katoder i luftningscellen.

Den jämna massförlustbestämda korrosionshastigheten hos anodplåtarna i siltig lera ökade kraftigt med 163 % från 14 till $36 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med liten katodplåt i fyllningsjord och med hela 362 % från 14 till $62 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med stor katodplåt i fyllningsjord. Korrosionshastigheten hos anodplåtarna i siltig lera ökade 1,7 gånger när arean hos katodplåtarna ökade 10 gånger.

Vid korrosion orsakad av luftningsceller och galvanisk korrosion (bimetallkorrosion) kan den totala korrosionen delas upp i korrosion orsakad av strömbelastning och egenkorrosion. Med egenkorrosion menas korrosion utan påverkan av strömbelastning. Egenkorrosionen vid korrosion orsakad av luftningsceller eller vid galvanisk korrosion är inte samma sak som ”vanlig” korrosion hos ett okopplat föremål, som inte utsätts för galvanisk korrosion eller korrosion orsakad av luftningsceller.

Korrosionen hos anodplåtarna i siltig lera orsakad av strömbelastning var $4,6 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med liten provplåt i fyllningsjorden och $29 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med stor provplåt. Korrosionen hos anoderna orsakad av strömbelastning ökade alltså 6,3 gånger när arean hos katodplåtarna ökade 10 gånger.

Egenkorrosion hos anoden var $31 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med liten provplåt i fyllningsjord och $33 \mu\text{m}/\text{år}$ vid hopkoppling med stor provplåt. Egenkorrosionen hos anoderna var alltså strängt taget oberoende av katodplåtarna area. En förklaring till detta kan vara att frånslagspotentialerna hos anoden i siltig lera var tämligen lika oavsett koppling till liten eller stor katod i fyllningsjord.

För anoderna i luftningscellen var egenkorrosionen större än korrosionen orsakad av strömbelastning. Egenkorrosionen hos anoderna var 6,7 gånger större än korrosion orsakad av strömbelastning vid hopkoppling med liten plåt i fyllningsjorden, men endast 1,1 gånger större vid hopkoppling med stor provplåt. Egenkorrosionen, $31 - 33 \mu\text{m}/\text{år}$, var mer än dubbelt så stor som korrosionshastigheten i okopplat tillstånd ($14 \mu\text{m}/\text{år}$).

I undersökningen har det visats att luftningsceller kan uppkomma i fält – detta är den viktigaste slutsatsen från undersökningen.

10 Referenser

1. **Svensson, C:** Geohydrologi. I: Handbok Bygg Geoteknik (Stål, T & Wedel, P, red.), sid 43 - 82. LiberFörlag, Stockholm 1984.
2. **Fagerström, H & Wiesel, C-E:** Permeabilitet och kapillaritet. Förslag till geotekniska laboratorieanvisningar, del 8. Byggforskningens informationsblad B7:1972. Statens institut för byggnadsforskning (ersattes senare av Byggforskningsrådet), Stockholm 1972.
3. **Tremblay, M:** Mätning av grundvattennivå och portryck. Information 16. Statens geotekniska institut, Linköping 1990.
4. **Bergdahl, U:** Geotekniska undersökningar i fält. Information 2. Statens geotekniska institut, Linköping 1984.
5. **Knutsson, G & Morfeldt, C-O:** Grundvatten. Teori & tillämpning. Tredje upplagan. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm 2002.
6. **Grip, H & Rodhe, A:** Vattnets väg från regn till bäck. Tredje upplagan. Hallgren & Fallgren Studieförlag AB, Uppsala 1994.
7. **Sederholm, B & Svensson, T & Vinka, T-G:** Korrosion på metaller i jordar med olika surhetsgrad och vattenhalt. Rapport R7:1992. Byggforskningsrådet, Stockholm 1992.
8. **Årebäck, M:** Hydrogeological investigations and corrosion monitoring in an urban soil profile in Göteborg, Sweden. Licentiatuppsats, Publ. A 77. Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg 1994.
9. **Vinka, T-G & Årebäck, M:** Korrosionsförhållande hos kolstål och zink i en urban jordlagerföljd. KI Rapport 1996:9. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1996.
10. **Norin, M:** Groundwater and soil properties in an urban environment and their effects on the corrosion of soil buried constructions of carbon steel and zinc. Licentiatuppsats, Publ. A 86. Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg 1998.
11. **Norin, M & Vinka, T-G:** Korrosion på kolstål och zink i fyllnadsgjord i stadsmiljö. KI Rapport 2003:5. Korrosionsinstitutet, Stockholm 2003.
12. **Norin, M & Vinka, T-G:** Corrosion of carbon steel in filling material in an urban environment. *Materials and Corrosion* 54(2003) s 641 - 651.
13. **Troselius, L:** Korrosionsrisker och motåtgärder vid jordförlagda metallkonstruktioner – stolpar och deras förankringsanordningar. I konferenspärm till konferensen *Korrosionsskydd i jord* den 9 - 10 maj 1984 i Stockholm anordnad av Korrosionsinstitutet. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1984.

14. **Troselius, L:** Korrosionsrisker under mark: stagförankringar i ställverk och spont i dammar. I konferenspärm till konferensen *Korrosionsskydd av vattenkraftverk* den 9 - 10 april 1991 i Sundsvall anordnad av Korrosionsinstitutet. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1991.
15. Svensk standard **SS-EN 10130:2006**. Utgåva 3, 2006. Kallvalsad mjuk tunnplåt av stål för kallformning – Tekniska leveransbestämmelser. SIS, Stockholm 2007.
16. Svensk standard **SS-EN 10020**. Utgåva 2, 2000. Definition och klassificering av ståltyper. SIS, Stockholm 2001.
17. Docol produktprogram för kallvalsad tunnplåt. Broschyr. SSAB Tunnplåt AB, Borlänge 2004.
18. **Gullman, J & Knotková, D & Kucera, V & Swartling, P & Vlčková, J;** Rosttröga stål i byggnader – skadefall och motåtgärder. Bulletin nr 94. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1985.
19. **Gullman, J & Swartling, P:** Riktlinjer för användning av rosttröga stål – korrosionstekniska synpunkter. Bulletin nr 97. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1984.
20. Produktprogram för rosttröga stål. Broschyr. SSAB Tunnplåt AB, Borlänge utan årtal.
21. Svensk standard **SS-EN 10025-5:2004**. Utgåva 1, 2004. Varmvalsat konstruktionsstål – Del 5: Tekniska leveransbestämmelser för konstruktionsstål med förbättrat motstånd mot atmosfärisk korrosion. SIS, Stockholm 2006.
22. Svensk standard **SS-EN 1652**. Utgåva 1, 1998. Koppar och kopparlegeringar – Plåt, band och rondeller för allmän användning. SIS, Stockholm 1998.
23. Svensk standard **SS 02 71 16**. Utgåva 3, 1989. Geotekniska provningsmetoder – Vattenkvot och vattenmättnadsgrad. SIS, Stockholm 1989. Standarden upphävd 2005-06-07.
24. **von Baeckmann, W & Schwenk, W & Prinz, W:** Handbook of cathodic corrosion protection. Third edition. Gulf Publishing Company, Houston 1997. (Engelsk översättning av: von Baeckmann, W & Schwenk, W & Prinz, W: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. 3. Auflage. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1989.)
25. **von Baeckmann, W & Schwenk, W:** Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. 4. Auflage. Wiley-VCH, Weinheim 1999.
26. **von Baeckmann, W & Fleig, W:** Meßtechnik beim kathodischen Korrosionsschutz. 4. Auflage. Kontakt & Studium, Band 93. Expert Verlag, Renningen 2000.
27. **Bette, U & Büchler, M:** Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. 8. Auflage. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2010.

28. **Lazzari, L & Pedferri, P:** Cathodic Protection. Polipress, Milano 2006.
29. **Martin, B A:** Potential measurement on buried pipelines. I: Ashworth, V & Booker, C J L (eds.): Cathodic Protection: Theory and Practice, Kapitel 17, sid 276 - 292. Ellis Horwood Limited, Chichester, UK, 1986.
30. **Wranglén, G:** Metallers korrosion och ytskydd. Kapitel N. Almqvist & Wiksell, Stockholm 1967.
31. **Mansfeld, F & Kenkel, J V:** Laboratory studies of galvanic corrosion. I. Two-metal couples. Corrosion 31(1975) s 298 - 302.
32. **Mansfeld, F & Hengstenberg, D H & Kenkel, J V:** Galvanic corrosion of Al alloys. I. Effect of dissimilar metal. Corrosion 30(1974) s 343 - 353.
33. **Zhang, X G:** Galvanic corrosion. I: Uhlig's Corrosion Handbook (Revie, R W, ed.). Second edition, s 137 - 164. John Wiley, New York 2000.
34. **Levlin, E:** Aeration cell corrosion of carbon steel in soil: in situ monitoring cell current and potential. Corrosion Science 38(1996) s 2083 - 2090.
35. **Levlin, E & Vinka, T-G:** Corrosion in an urban soil profile – Aeration cell experiment in situ in the soil. EUROCORR 2000, Past Successes – Future Challenges, 10 - 14th September 2000, London. Congress proceedings på CD-ROM utgiven av IOM Communications Ltd, London 2000.
36. Svensk standard **SIS 14 13 16**. Utgåva 1, 1977. Stål för kallvalsad tunnplåt för konstruktionsändamål – Stål 13 16. SIS, Stockholm 1977. Standarden upphävd 2005-09-07.
37. Kungl. Lantbruksstyrelsens kungörelse Nr 1. Kungliga Lantbruksstyrelsen, Solna 1965.
38. Laboratoriekompodium i marklära för agr. och hort. stud. (Linde, M, m fl, red.). Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för markvetenskap, Avdelningen för marklära, Uppsala 1991.
39. **Arrhenius, O:** The corrosion of steel in soil. Tekniska skrifter nr 159. Teknisk Tidskrifts Förlag, Stockholm 1956.
40. **Arrhenius, O:** Soils and corrosion. Bulletin No 46. IVA:s Korrosionsnämnd, Stockholm 1965.
41. **Thielers, M:** Korrosion hos bly och blylegeringar i mark. Konferenshandlingar, Andra nordiska korrosionsmötet, Stockholm 1958. Meddelande 18. IVA:s Korrosionsnämnd, Stockholm 1958.
42. **Camitz, G:** Korrosionsundersökningar i jord. Bestämning av jordars resistivitet. Bulletin nr 88. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1980.

BILAGOR

INNEHÅLL

Tabeller

Tabell a Sammansättning hos sanden

Tabell b Sammansättning hos vattenledningsvattnet

Tabell c Sammansättning hos stålet och kopparen

Tabell d Vattenhalt, vattenkvot och vattenmättnadsgrad på olika provnivåer

Tabell e Korrosionshastighet för okopplade provplåtar

Tabell f Korrosionshastighet för kopplade provplåtar

Tabell g Frätgropsdjup för okopplade och kopplade provplåtar

Tabell a. Total kemisk sammansättning samt vattenhalt och glödgningsförlust hos Fylesand 65.

Sandens totala kemiska sammansättning har analyserats vid Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg. Den torra sanden med kornstorlek mindre än 2 mm har malts ned till ett fint pulver, som utgjorde analysprov. Analyserna av kalcium, magnesium, natrium, kalium, järn och mangan har utförts med atomabsorptionsspektrofotometri efter upplösning av sandprovet i koncentrerad fluorvätesyra. Kisel, aluminium och titan bestämdes spektrofotometriskt. Halten av tvåvärt järn har bestämts vätkemiskt med titrering.

Grundämnen, som är vanliga beståndsdelar i bergarter och jordarter, förekommer tillsammans med syre i bestämda mängdförhållanden, därför anges att provet består av oxider av de olika grundämnena. Summan av oxiderna plus glödgningsförlusten och vattenhalten blir i det närmaste 100 mass-%. Glödgningsförlusten är ett ungefärligt mått på den organiska halten i jordprovet, men också karbonater samt kemiskt bundet vatten främst från lermineral bidrar i viss utsträckning till massminskningen vid glödgningen.

Förening eller parameter	Halt mass-%
SiO ₂	99,44
FeO	0,11
Na ₂ O	0,02
TiO ₂	0,02
K ₂ O	0,006
MgO	0,004
MnO	0,001
Al ₂ O ₃	u d ¹
CaO	u d ¹
Fe ₂ O ₃	u d ¹
Vattenhalt, 105 °C	0
Glödgningsförlust, 1100 °C	0,01
Totalt	99,61

1) Halten under detektionsgränsen.

Tabell b. Sammansättning hos vattenledningsvattnet. Provtagning ur kran på Korrosionsinstitutet.

Analys	Halt
pH-värde	8,5
Konduktivitet (25 °C), mS/m	28,5
Kemisk syreförbrukning COD _{Mn} , mg O₂/ℓ	3
Alkalinitet, mg HCO₃⁻/ℓ	73
Totalhårdhet, mg Ca/ℓ	44
Totalhårdhet, °dH	6,2
Kalcium, mg Ca/ℓ	36
Magnesium, mg Mg/ℓ	6
Natrium, mg Na/ℓ	11
Kalium, mg K/ℓ	3
Järn, mg Fe/ℓ	0,04
Mangan, mg Mn/ℓ	< 0,01
Koppar, mg Cu/ℓ	0,05
Klorid, mg Cl⁻/ℓ	20
Sulfat, mg SO₄²⁻/ℓ	48
Ammonium, mg NH₄⁺-N/ℓ	0,02
Nitrat, mg NO₃⁻/ℓ	< 2
Nitrit, mg NO₂⁻-N/ℓ	0,002
Fosfat, mg PO₄³⁻-P/ℓ	< 0,01
Totalfosfor, mg P/ℓ	< 0,01

Tabell c. Sammansättning hos stålet och kopparen, som användes vid undersökningarna.

Stål FeP06	
Grundämne	Halt mass-%
Kol, C	0,008
Titan, Ti	0,088
Mangan, Mn	0,059
Aluminium, Al	0,038
Nickel, Ni	0,022
Koppar, Cu	0,010
Svavel, S	0,010
Krom, Cr	0,007
Molybden, Mo	0,007
Fosfor, P	0,006
Kisel, Si	0,005
Kväve, N	0,005
Vanadin, V	0,004
Niob, Nb	< 0,004
Bor, B	< 0,0003
Järn, Fe	Resterande

Koppar SS 50 14-4	
Grundämne	Halt mass-%
Koppar, Cu	99,99
Arsenik, As	0,001
Järn, Fe	0,001
Kadmium, Cd	0,001
Silver, Ag	0,001
Svavel, S	0,001
Vismut, Bi	0,001
Aluminium, Al	< 0,001
Bly, Pb	< 0,001
Bor, B	< 0,001
Fosfor, P	< 0,001
Kalium, Ca	< 0,001
Kisel, Si	< 0,001
Kobolt, Co	< 0,001
Krom, Cr	< 0,001
Mangan, Mn	< 0,001
Nickel, Ni	< 0,001
Selen, Se	< 0,001
Tellur, Te	< 0,001
Tenn, Sn	< 0,001
Zink, Zn	< 0,001

Tabell d. Vattenhalt (mass-%), vattenkvot, vattenhalt (vol-%) och vattenmättnadsgrad (vol-%) i kvartssanden på olika provnivåer i olika provkärl. Resultaten avser medelvärde från två prov.

Provkärl Provnivå	Vattenhalt mass-% av fuktig jord	Vattenkvot mass-% av torr jord	Vattenhalt vol-%	Vattenmätt- nadsgrad vol-%
Okopplade plåtar				
1	0,03	0,03	0,48	0,13
2	0,92	0,93	1,5	3,9
3	6,6	7,1	11	30
4	10,2	11,4	18	47
5	19,1	23,7	38	99
Kopplade plåtar				
1	0,05	0,05	0,07	0,19
2	1,5	1,5	2,5	6,4
3	5,9	6,3	10	26
4	18,6	22,9	37	96
5	19,0	23,4	38	98
Galvanisk korrosion				
1	3,5	3,6	5,8	15
2	4,2	4,4	7,1	18
3	7,6	8,2	13	34
4	17,8	21,6	35	90
5	19,4	24,1	39	101

Tabell e. Korrosionshastighet, medelfrättdjup, maximal lokal korrosionshastighet och gropfrättningsfaktor för **okopplade provplåtar** av kolstål exponerade i kvartssand med olika vattenhalt under 56 dygn (0,15 år). Medelvärde och standardavvikelse anges för dubbelprov.

Prov-nivå	Prov-nr	Korr.hast. ($\mu\text{m}/\text{år}$)			Medelfrättdjup (μm)			Max. lokal korr. hast. ($\mu\text{m}/\text{år}$)			Gropfrättningsfaktor		
		Resultat för varje enskild plåt	Medelvärde	Standardavvikelse	Resultat för varje enskild plåt	Medelvärde	Standardavvikelse	Resultat för varje enskild plåt	Medelvärde	Standardavvikelse	Resultat för varje enskild plåt	Medelvärde	Standardavvikelse
Nivå 1	1	17	16	1,3	2,6	2,4	0,2	1125	961	164	66	61	5,5
	6	14			2,2			797			55		
Nivå 2	2	31	31	0,2	4,7	4,8	0,02	1823	1726	98	59	56	3,4
	7	31			4,8			1628			52		
Nivå 3	3	104	83	21	16	13	3,2	2320	2365	45	22	30	8,0
	8	63			9,6			2409			38		
Nivå 4	4	11	10	0,4	1,6	1,6	0,05	109	141	32	10	14	3,6
	9	10			1,5			173			17		
Nivå 5	5	8,1	7,4	0,6	1,2	1,1	0,1	8,1	7,4	0,6	1,0	1,0	0
	10	6,8			1,0			6,8			1,0		

Tabell f. Korrosionshastighet, medelfrättdjup, maximal lokal korrosionshastighet och gropfrättningsfaktor för **kopplade** provplåtar av kolstål exponerade i kvartssand med olika vattenhalt under 56 dygn (0,15 år). Medelvärde och standardavvikelse anges för dubbelprov.

Prov-nivå	Prov-nr	Korr.hast. ($\mu\text{m}/\text{år}$)			Medelfrättdjup (μm)			Max. lokal korr. hast. ($\mu\text{m}/\text{år}$)			Gropfrättningsfaktor		
		Resultat för varje enskild plåt	Medelvärde	Standardavvikelse	Resultat för varje enskild plåt	Medelvärde	Standardavvikelse	Resultat för varje enskild plåt	Medelvärde	Standardavvikelse	Resultat för varje enskild plåt	Medelvärde	Standardavvikelse
Nivå 1	11	30	26	3,9	4,6	4,0	0,6	1236	1164	72	41	45	3,9
	16	22			3,4			1091			49		
Nivå 2	12	11	13	2,2	1,6	2,0	0,3	1119	1131	12	105	90	14
	17	15			2,3			1143			76		
Nivå 3	13	18	16	2,0	2,8	2,5	0,3	2136	2151	14	119	136	18
	18	14			2,2			2165			154		
Nivå 4	14	43	44	0,5	6,7	6,7	0,1	219	132	88	5,1	3,0	2,0
	19	44			6,8			44			1,0		
Nivå 5	15	15	16	0,8	2,3	2,4	0,1	15	16	0,8	1,0	1,0	0
	20	17			2,5			17			1,0		

Tabell g. Frätgropsdjup för de två djupaste frätgroparna på varje sida (sida A respektive B) för okopplade respektive kopplade provplåtar. Till det uppmätta frätgropsdjupet har medelfrättdjupet för aktuell provplåt adderats. Det största frättdjupet på varje provplåt har angetts med fet stil.

Provkärl	Provnivå	Prov nr	Frätgropsdjup (μm)	
			Sida A	Sida B
Kärl med okopplade plåtar	1	1	173 , 163	153, 123
		6	122 , 112	112, 102
	2	2	280 , 210	175, 150
		7	210, 165	250 , 195
	3	3	356 , 261	346, 326
		8	370 , 245	365, 280
	4	4	17	2*
		9	2*	27 , 22
	5	5	1*	1*
		10	1*	1*
Kärl med kopplade plåtar	1	11	190 , 140	185, 165
		16	167 , 157	143, 140
	2	12	172 , 148	132, 126
		17	142, 93	175 , 116
	3	13	157, 133	328 , 327
		18	332 , 105	228, 174
	4	14	34	7*
		19	7*	7*
	5	15	2*	2*
		20	3*	3*

* Inga frätgropar på denna sida av provplåten, enbart jämn korrosion.